



Universidade de Aveiro Departamento de Física
2009

**NUNO GONÇALO ESTUDO DO AFLORAMENTO IBÉRICO:
FERREIRA CORDEIRO FILAMENTOS E CLIMATOLOGIA SUPERFICIAL**



**NUNO GONÇALO
FERREIRA CORDEIRO** **ESTUDO DO AFLORAMENTO IBÉRICO:
FILAMENTOS E CLIMATOLOGIA SUPERFICIAL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Jesus Manuel Pedreira Dubert, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e co-orientação da Doutora Maria Rita Teixeira de Sampaio Nolasco, Equiparada a Investigadora Auxiliar CESAM-UA

o júri

presidente

Prof. Doutor José Fortes do Nascimento Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutor Paulo Nogueira Brás de Oliveira
Investigador Auxiliar do IPIMAR

Prof. Doutor Jesus Manuel Pedreira Dubert
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Doutora Maria Rita Teixeira de Sampaio Nolasco
Equiparada a Investigadora auxiliar do CESAM-UA (Co-Orientadora)

agradecimentos

Esta dissertação de Mestrado foi realizada no âmbito do projecto da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia): Connect - Avaliação da conectividade entre populações marinhas utilizando ferramentas genéticas e de modelação oceanográfica TDC/BIA-BDE/65425/2006, e representa uma contribuição para o projecto: CLIBECO – Climate changes in the Iberian Upwelling Ecosystem: a regional retrospective and scenario study approach, PPCDT/CLI/57752/2004.

palavras-chave

Temperatura da Superfície do Oceano (SST), Afloramento Costeiro, Filamento, Climatologia Oceânica

resumo

Imagens de satélite contendo valores de temperatura da superfície do oceano (SST) são utilizadas para estudar a climatologia da distribuição da temperatura à superfície, assim como o desenvolvimento e a variabilidade dos filamentos observados durante a época de Verão para o período de 2001 a 2008 na costa Oeste da Península Ibérica.

A época de afloramento costeiro inicia-se em Maio/Junho prolongando-se até Setembro/Outubro. Durante esta época a temperatura da superfície do oceano é geralmente inferior junto à costa em presença de uma frente que separa as águas afloradas costeiras das águas do oceano aberto. Esta frente coexiste com um jacto de afloramento que se dirige para Sul na costa Oeste.

Instabilidades associadas a esta frente ou interações entre o jacto e os acidentes topográficos (cabos, canhões submarinos e promontórios) originam filamentos de águas afloradas que se estendem da costa até o alto mar. Estes filamentos incrementam a sua presença e a sua dimensão entre o mês de Junho até um máximo em Agosto/inícios de Setembro, quando atingem comprimentos da ordem dos 150 Km, e decrescem em tamanho e quantidade até que se tornam raros em Outubro. Foi feita a caracterização e análise destas estruturas com base num tratamento de dados automático, que permite estudar a variabilidade sazonal e interanual dos filamentos durante o período em estudo. Este tratamento foi aplicado também com metodologias similares às saídas de um modelo numérico para o mesmo período. Foi feita uma comparação entre os resultados do modelo e as imagens de satélite de forma a proceder à validação deste. Foi ainda feito um estudo e uma discussão da climatologia com base nas imagens de satélite e no modelo referido, de forma a caracterizar, para o campo da temperatura à superfície, as médias mensais, o desvio padrão e os desvios em relação à média. Estas grandezas foram analisadas em conjunto com os resultados de uma reanálise de séries de vento em vários pontos do domínio, no período em estudo.

keywords

Sea Surface Temperature (SST), Coastal Upwelling, Filament, Oceanic Climatology

abstract

Satellite images containing sea surface temperature values (SST) are used to study the climatology of the surface temperature distribution, as well as filament development and variability observed during the Summer season for 2001 to 2008 period on the Western Iberian Peninsula.

The coastal upwelling season begins in May/June prolonging until September/October. During this time the sea surface temperature is generally inferior alongshore presenting a front that separates the upwelled water from the offshore water. This front coexists with a southward upwelling jet in the West coast. Instabilities associated with this front or interactions between the jet and the topographic features (capex, submarine canyons and promontories) create upwelled water filaments that extend offshore from the coast. The presence and size of this filaments rise from June until August/early September, when they reach maximum length on the order of 150 Km, and decrease in size and number until they become rare in October. Was made a characterization and analysis of this structures based on an automatic data treatment, which allows to study the filaments seasonal and interannual variability for the studied period. This treatment was also applied with similar methods to the outputs of a numeric model for the same period. A comparison was made between the model results and the satellite images in order to make validation of the former. Was even made a study and a discussion of the climatology based on the satellite images and the referred model, in a way to characterize, for the surface temperature field, the mensal means, standard deviation and the deviations from the mean. These quantities were analyzed along with the output of a wind reanalysis in several points in the studied domain, for the studied period.

Índice

1. Introdução.....	1
2. Objectivos	5
3. Métodos	7
3.1 Tratamento de dados das SST de Satélite	7
3.2 Modelo	10
3.3 Ventos	10
4. Resultados.....	13
4.1 Climatologias dos valores médios mensais de SST do Satélite e do Modelo	13
4.1.1 Comportamento geral	13
4.1.2. Distribuição média do Satélite.....	14
4.1.3. Distribuição média do Modelo	14
4.2. Climatologia dos desvios padrões do satélite e Modelo.....	15
4.3. Variabilidade interanual da temperatura	17
4.4. Distribuição Espaço-temporal de filamentos de afloramento	21
4.4.1. Estudo integrado da presença de filamentos	21
4.4.2. Distribuição anual e meridional dos filamentos e suas direcções e comprimentos	28
5. Discussão.....	35
6. Conclusão	37
7. Referências.....	39

Índice de Figuras

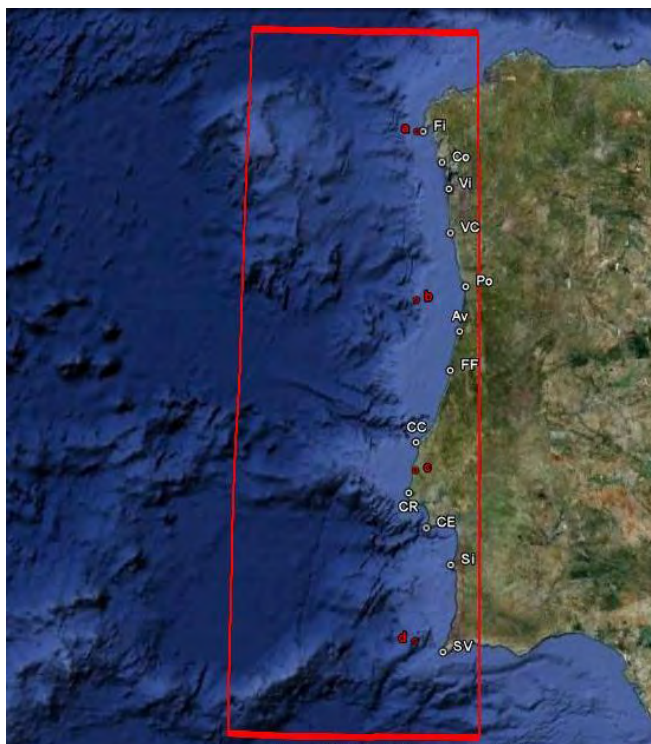
Figura 1. Costa Oeste da Península Ibérica. Área delimitada pelas linhas vermelhas indica região estudada. Os pontos representados são localizações importantes na costa com legenda na tabela à direita. Os pontos vermelhos a, b, c e d são pontos das séries de dados de velocidade do vento e serão utilizados na secção 3.	1
Figura 2. Exemplos de imagens (a) excluída 02h de 5 de Junho de 2002 devido à extensa presença de nuvens. (b) não excluída 02h de 12 de Julho de 2006 onde se observa efeito da passagem de nuvens. (c) excluída 02h de 9 de Junho de 2004 com erros evidentes da imagem do satélite na zona Sul. A azul-escuro são pontos de gradiente superior a $0,075^{\circ}\text{C}/\text{km}$	9
Figura 3. Exemplos de imagens; (a) filamento cuja extremidade offshore não é explícita; (b) filamento cuja origem não é facilmente detectável ; (c) filamento em que a sua extensão não é recta; (d) zona saturada aos 16°C onde não são detectados gradientes horizontais de temperatura.	9
Figura 4. Médias mensais da tensão do vento resultante do NCEP2 (2009) em quatro pontos ao largo da costa Ibérica.	11
Figura 5. Médias mensais da componente meridional da tensão do vento resultante do NCEP2 (2009) em quatro pontos ao largo da costa Ibérica.	12
Figura 6. Médias mensais dos oito anos em estudo das imagens de satélite, em $^{\circ}\text{C}$	13
Figura 7. Médias mensais dos oito anos em estudo dos resultados do modelo, em $^{\circ}\text{C}$	15
Figura 8. Desvio padrão mensal dos oito anos em estudo, imagens de satélite, em $^{\circ}\text{C}$	16
Figura 9. Desvio padrão mensal dos oito anos em estudo, resultados do modelo, em $^{\circ}\text{C}$	17
Figura 10. Desvios anuais em relação à media dos oito anos em Junho e em Julho.	19
Figura 11. Desvios anuais em relação à media dos oito anos em Agosto e em Setembro.	20
Figura 12. (Azul) número de filamentos observados nas imagens de Satélite em cada intervalo de 5 dias no período 2001 a 2008. (amarelo) número de imagens utilizadas na detecção de filamentos em cada intervalo de 10 dias no período 2001 a 2008.	22
Figura 13. Número de filamentos observados nas imagens do modelo em cada intervalo de 5 dias no período 2001 a 2008.	22

Figura 14. (azul) comprimento médio nos oito anos em estudo de filamentos observados nas imagens de satélite em cada intervalo de 5 dias. (amarelo) comprimento do maior filamento observado nas imagens de satélite ao longo dos oito anos em estudo em cada intervalo de 5 dias.	23
Figura 15. (azul) Comprimento médio dos oito anos em estudo de filamentos observados nas imagens do modelo em cada intervalo de 5 dias. (amarelo) comprimento do maior filamento observado nas imagens do modelo ao longo dos oito anos em estudo em cada intervalo de 5 dias.	24
Figura 16. (azul) número de origens de filamentos observados nas imagens de satélite em cada um dos 50 intervalos de latitudes igualmente espaçados de $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N no período 2001 a 2008; (amarelo) número de imagens onde menos de 25% de cada intervalo de latitudes é composto por nuvens.....	26
Figura 17. Número de origens de filamentos observados nas imagens do modelo em cada um dos 50 intervalos de latitudes igualmente espaçados de $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N no período 2001 a 2008.	26
Figura 18. (azul) comprimento médio dos filamentos observados nas imagens de satélite em cada um dos 50 intervalos de latitudes igualmente espaçados de $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N ; (amarelo) comprimento do filamento máximo encontrado em cada um dos 50 intervalos igualmente espaçados entre 36°N e 44°N	27
Figura 19. (azul) Comprimento médio dos filamentos observados nas imagens do modelo em cada um dos 50 intervalos de latitudes igualmente espaçados $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N ; (amarelo) comprimento do filamento máximo encontrado em cada um dos 50 intervalos igualmente espaçados de $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N	28
Figura 20. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica durante os meses de Verão do ano 2003. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.	30
Figura 21. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica durante os meses de Verão do ano 2006. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.	32
Figura 22. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica durante os meses de Verão do ano 2007. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.	34

1. Introdução

A costa Atlântica da Península Ibérica (PI) está localizada na zona entre-giro (o giro subtropical e o giro subpolar) sendo a grande escala dominante a corrente de Portugal, com um escoamento fraco na direcção Norte-Sul [Saunders, 1982]. Nas latitudes a Sul da Península Ibérica a Circulação é influenciada pela corrente dos Açores e a sua conexão com o Golfo de Cádiz [Peliz et al, 2007].

A Costa Oeste da Península Ibérica possui uma topografia complexa (figura 1) incluindo canhões (de Aveiro e Nazaré), promontórios (Estremadura) e cabos com variação da linha de costa de 90° (Cabo São Vicente, Cabo da Roca e Cabo Espichel a Sul, e Cabo Finisterra a Norte).



Fi	Cabo Finisterra	42,9°N
Co	Corrubedo	42,5°N
Vi	Vigo	42,2°N
VC	Viana do Castelo	41,7°N
Po	Porto	41,1°N
Av	Aveiro	40,6°N
FF	Figueira da Foz	40,1°N
CC	Cabo Carvoeiro	39,3°N
CR	Cabo da Roca	38,8°N
CE	Cabo Espichel	38,4°N
Si	Sines	38°N
SV	Cabo de São Vicente	37°N

Figura 1. Costa Oeste da Península Ibérica. Área delimitada pelas linhas vermelhas indica região estudada. Os pontos representados são localizações importantes na costa com legenda na tabela à direita. Os pontos vermelhos a, b, c e d são pontos das séries de dados de velocidade do vento e serão utilizados na secção 3.

Na época de Inverno o gradiente de temperatura meridional é em parte responsável pela geração de correntes em direcção à costa através do vento térmico. Na zona da vertente continental as águas dessa corrente são desviadas para Norte, dando origem ao denominado sistema de correntes para o pólo IPC (Iberian Poleward current system)[Peliz et al, 2005]. A IPC é intensificada pelo forçamento dos ventos de Sul mais frequentes no Inverno. Na região costeira a circulação superficial é também influenciada pelas plumas de águas mais doces resultantes da descarga de águas dos rios (WIBP=Western Iberia Bouyant Plume) [Santos et al, 2004].

A camada de mistura de Inverno atinge profundidades entre 100m e 200m [Peliz et al, 2005]. A estratificação vertical é portanto reduzida durante o Inverno e inícios da Primavera.

Durante a época da Primavera, Abril-Maio dá lugar à denominada transição de Primavera e o oceano começa a estratificar-se. Inicia também o afloramento costeiro do início de estação, no entanto gera pouco contraste térmico à superfície porque a estratificação ainda não é forte.

A época do afloramento costeiro inicia-se quando o anticiclone dos Açores está situado no Atlântico central, por conseguinte o gradiente de pressão resultante gera ventos de componente Norte ao longo da costa Oeste Ibérica. A tensão do vento à superfície do oceano gera uma camada de Ekman superficial, cujo transporte associado é na direcção para o largo, o que provoca uma divergência costeira, e está na origem do sistema de afloramento, denominado sistema de afloramento do ecossistema Ibérico (I.U.E.). Como consequência a superfície livre do oceano inclina-se, sendo mais baixa junto à costa e alta ao largo da costa, gerando um jacto para Sul (com valores máximos de uma ordem de grandeza de 40cm/s [Peliz et al, 2002]). Abaixo da camada superficial a corrente tem direcção para a costa e junto ao fundo é desviada para a esquerda devido à influência da camada de Ekman de fundo. A água aflorada é mais fria que a superficial originando-se uma frente térmica entre a costa e o largo com gradientes de temperatura na ordem dos 0.01°C/km a 0.02°C/km.

A partir de Junho a estratificação aumenta devido ao incremento do fluxo radiativo de curto comprimento de onda, e associada a períodos mais frequentes de ventos de Norte, gera-se frente térmica de afloramento que se estende pela plataforma continental, inicialmente aproximadamente paralela à linha de costa. Esta frente destabiliza gerando ondulações de curta escala espacial na ordem dos 20km denominada instabilidade frontal [Barth et al, 1994]. A frente vai-se deslocando para o largo com a predominância do vento de Norte até meados de Agosto. À medida que a frente se desloca para o largo apresenta instabilidades frontais do tipo instabilidade baroclínica [Narimousa e Maxworthy, 1989; Haynes et al, 1993] cuja escala é maior do que as

anteriores, da ordem de $2\pi \cdot R$ com R o raio baroclínico de Rossby $R \approx \frac{\sqrt{g'h}}{f}$ com g' gravidade reduzida, h espessura da camada superior e f parâmetro de coriolis. A partir de meados de Agosto até fim de Setembro é a época de pleno desenvolvimento do afloramento e de filamentos até atingem máxima extensão [haynes et al, 1993].

Esta instabilidade da frente e o seu respectivo jacto são lugar ao aparecimento de filamentos que são línguas de água fria com assinatura à superfície que se prolongam da costa para o largo e são separados das águas oceânicas circundantes mais quentes por frentes térmicas tipicamente mais extensas na direcção para fora da costa (O(100 Km)) do que na direcção ao

longo da costa ($O(10\text{ km})$). O processo de formação dos filamentos ainda não está completamente compreendido mas existem teorias aceites para a sua formação na costa oeste Ibérica. Em Haynes et al (1993) são explicados alguns mecanismos de formação:

- Instabilidades dinâmicas do fluxo: Instabilidades baroclinicas inerentes aos fluxos associados ao afloramento, entre a corrente para o equador superficial e a corrente profunda para o pólo, podem levar à formação de filamentos. São geralmente de pequena escala e as suas posições em relação à costa variam com o tempo.
- Forçamento Topográfico: Processos de dinâmica costeira associados com irregularidades na linha de costa e da plataforma continental e variações da tensão do vento podem levar a formação de filamentos. Separação ou bloqueio de correntes paralelas à costa por cabos ou cristas submarinas ou variações de tensão do vento no espaço ou no tempo podem levar a forte fluxo para o largo.
- Turbulência geostrófica: A interacção de eddies oceânicos pré-existentes com a zona de afloramento costeiro pode levar a formação de filamentos. O bordo Este do oceano Atlântico Norte é uma zona onde os meddies de água mediterrânea, ou outro tipo de vórtice têm importância na dinâmica costeira da zona de transição [Oliveira et al, 2000].

Os três processos de formação descritos provavelmente não são mutuamente exclusivos, particularmente numa região de batimetria e topografia costeira complexas como a costa atlântica da Península Ibérica. A importância relativa de cada processo determina a posição e tamanho de cada filamento. Por exemplo, topografia costeira, batimetria ou variações de tensão do vento podem iniciar instabilidades no campo de correntes superficiais. Estas instabilidades podem crescer e gerar eddies que interagem com a região de afloramento costeiro para formar filamentos [Haynes et al, 1993].

O arrefecimento do Outono e a diminuição na frequência de ventos de Norte levam ao desaparecimento dos filamentos em Outubro juntamente com o desenvolvimento do fluxo para o pólo de água subtropical quente que, caracteriza época de afundamento costeiro nestas latitudes [Haynes et al, 1993], descrita atrás.

2. Objectivos

Os principais objectivos científicos deste trabalho podem resumir-se em:

- i) Estudar a climatologia da distribuição de temperatura da superfície do oceano (SST) da época de Verão para a costa Oeste da Península Ibérica, e a sua variabilidade interanual para o período 2001 a 2008, com base em dados de satélite e de modelação numérica, comparando ambos.
- ii) Estudar a distribuição espacial e temporal dos filamentos de afloramento na costa Oeste da Península Ibérica durante os meses de Junho a Setembro dos anos 2001 a 2008, com base em dados de satélite e de modelação numérica, comparando ambos.
- iii) Aprender e interpretar técnicas estatísticas para a manipulação de um grande volume de dados, resultante da medição por satélite e obtida com base na modelação numérica.
- iv) Contribuir para a validação de um sistema de modelação realista implementado no CESAM, comparando resultados do modelo com os do satélite.

3. Métodos

3.1 Tratamento de dados das SST de Satélite

- Origem dos dados

Os dados de SST (sea surface temperature) são originários de satélites Americanos de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) com o sensor designado AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) cujos dados foram processados pelo CERSAT e em forma de matrizes com resolução próxima de 2 km, quatro imagens por dia (02h, 10h, 12h, 20h). CERSAT (IFREMER-França) processou os dados recolhidos na estação meteorológica de Lannion (França) e disponibilizou-os em formato NetCDF (CMS, 2005).

- Processamento

O Matlab é o programa usado no tratamento dos dados NetCDF. Cada ficheiro inclui valores em malha de temperatura para criação do mapa SST de um instante de tempo. São apenas utilizados os ficheiros das 02h para que os resultados não sejam afectados pela radiação solar que incide sobre o oceano aquecendo sobretudo a camada superficial que é a camada que o satélite está a amostrar. Os pontos que não contêm valores de temperatura, quer seja por ter nuvens a bloquear ou ser superfície terrestre, são representados na malha como NaN (not-a-number) para serem excluídos do processamento de dados. Cria-se então um ficheiro “.mat” (formato padrão de ficheiros de dados do Matlab) para cada mês com uma variável (temperatura) de três dimensões: latitude, longitude e tempo (dia do ano). O ficheiro mensal facilita no cálculo das médias e desvios padrões mensais aplicados aos oito anos de amostras (2001-2008, Junho-Setembro). Depois de determinar a média mensal em cada ano calcula-se a média dos 8 anos para cada mês, os respectivos desvios padrões e os desvios de cada ano às médias mensais (anomalias mensais).

- Extracção da informação dos filamentos

Com o intuito de estudar a distribuição espacial e temporal dos filamentos, na imagem de satélite anteriormente descrita em cada dia é gerado um mapa SST sobreposto pela representação de pixéis onde o gradiente horizontal de temperatura é superior a $0,075\text{ }^{\circ}\text{C/km}$. Com a representação do gradiente de temperatura é facilitada a observação das fronteiras laterais dos filamentos onde os gradientes são máximos. O valor de $0,075\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ foi escolhido após uma série de ensaios com outros valores ($0,2$, $0,1$, $0,05\text{ }^{\circ}\text{C/km}$). Com $0,1$ e $0,2\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ o mapa de gradientes representado mostrava-se pouco saturado não se detectando alguns filamentos. Com $0,05\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ o mapa seria demasiado saturado tornando por vezes difícil a distinção entre filamentos.

Em primeira análise foram excluídas as imagens que devido à presença de nuvens em todo o domínio não permitiam retirar ilações sobre a presença ou ausência de filamentos (figura 2a) e foram também excluídas algumas que continham erros evidentes da temperatura (figura 2c). Outras imagens foram deixadas para análise mesmo contendo valores errados (ex: figura 2b) mas que não influenciam de forma evidente a detecção de filamentos.

Com a ajuda da ferramenta “ginput” que serve para localizar pontos sobre um gráfico em Matlab procedeu-se à marcação manual de pontos sobre cada imagem. A marcação dos pontos é feita de modo a que o primeiro seja marcado sobre a origem estimada (ponto junto à costa) de um filamento e o segundo sobre o ponto mais afastado da costa do filamento determinando-se as suas latitudes e longitudes. Foi concebido um programa para tratar os pontos recolhidos e obter comprimentos e direcções dos filamentos.

As origens dos filamentos situam-se na intersecção do prolongamento do eixo da língua de água fria com a costa. Considerar o meio-termo como sendo $0,075^{\circ}\text{C}/\text{km}$ não garante boa qualidade em todos os mapas para encontrar filamentos. Existem pelo menos quatro situações de dificuldade em encontrar origens ou extremidades (figura 3):

(a) O gradiente horizontal de temperatura não converge para um ponto não se observando o exacto local da extremidade offshore, marca-se num ponto esperado a partir apenas da temperatura.

(b) Situação em que o filamento está visível mas não é fácil encontrar um ponto exacto para a origem devido ao gradiente elevado junto à costa. Procura-se a bissectriz aproximada entre as duas extremidades laterais do filamento, a origem é então a sua intersecção com a costa.

(c) Filamento com forma curvilínea. Os pontos do filamento são marcados de modo a que a recta representativa do filamento inclua o mais possível o interior do filamento mesmo se não representa todo o seu comprimento.

(d) Quando a temperatura do oceano desce abaixo dos 16°C a observação de zonas cujo gradiente é superior a $0,075^{\circ}\text{C}/\text{km}$ torna-se impossível. O historial (dias anteriores) permite prever a possível existência de filamentos.

Com as Latitudes das origens e comprimentos dos filamentos em cada dia de dados disponíveis são calculadas as suas estatísticas utilizando métodos semelhantes aos de Haynes et al, 1993.

Ao nível temporal são feitos histogramas com intervalos de 5 dias entre 1 de Junho e 30 de Setembro em que cada barra contém o número de filamentos encontrados nesse intervalo de tempo ao longo dos oito anos (secção 4.4.1a) e outro histograma em que cada barra contém a média do comprimento dos filamentos encontrados nesse intervalo ao longo dos oito anos (secção 4.4.1b). Incluído no primeiro está outro histograma com intervalos de 10 dias representando o número de imagens disponíveis e no segundo está incluído com intervalos de 5 dias o máximo comprimento de um filamento contido no intervalo.

Ao nível espacial são feitos os mesmos histogramas mas todos contêm 50 intervalos de latitudes entre 36°N e 44°N (secções 4.4.1c e 4.4.1d).

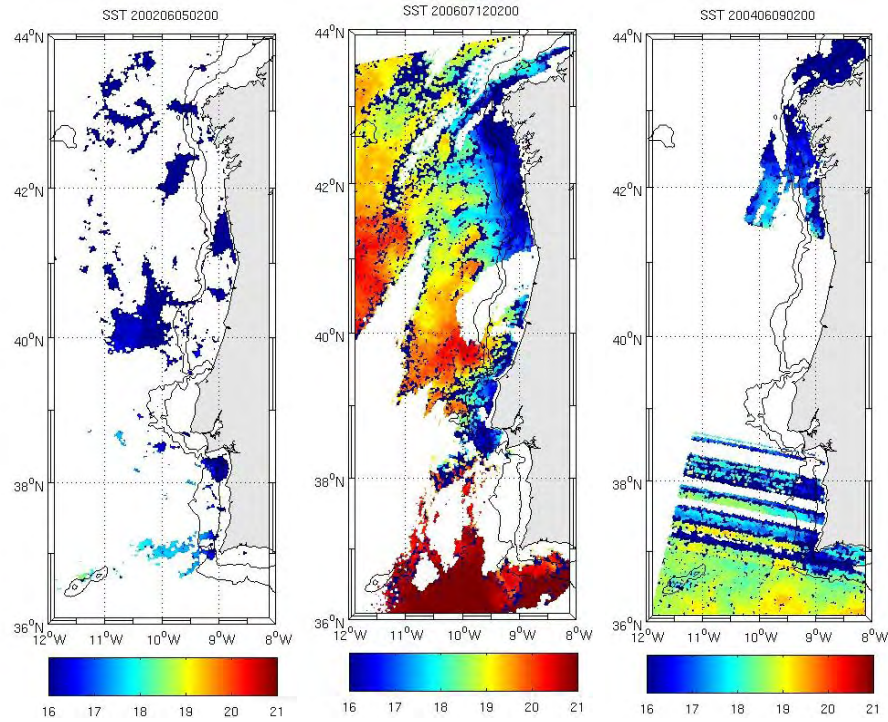


Figura 2. Exemplos de imagens (a) excluída 02h de 5 de Junho de 2002 devido à extensa presença de nuvens. (b) não excluída 02h de 12 de Julho de 2006 onde se observa efeito da passagem de nuvens. (c) excluída 02h de 9 de Junho de 2004 com erros evidentes da imagem do satélite na zona Sul. A azul-escuro são pontos de gradiente superior a $0,075^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

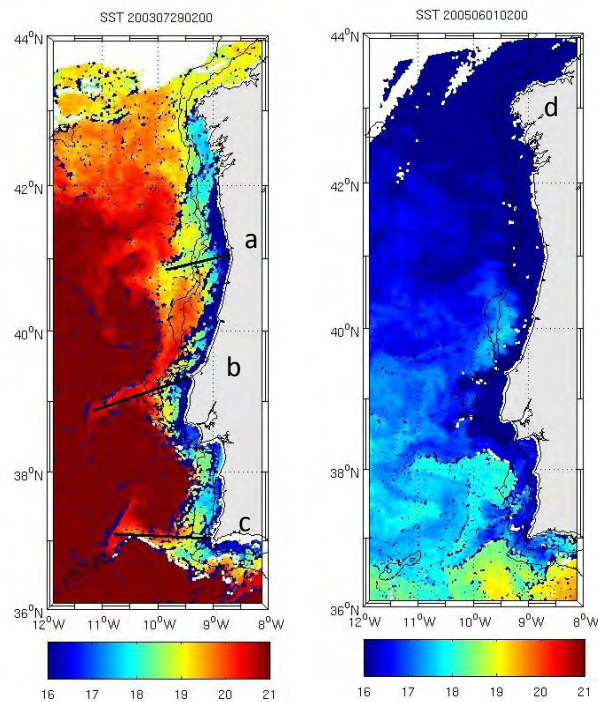


Figura 3. Exemplos de imagens; (a) filamento cuja extremidade offshore não é explícita; (b) filamento cuja origem não é facilmente detectável ; (c) filamento em que a sua extensão não é recta; (d) zona saturada aos 16°C onde não são detectados gradientes horizontais de temperatura.

3.2 Modelo

O modelo utilizado para comparação com os resultados das imagens de satélite e consequente validação, é o modelo numérico oceânico ROMS (Regional Oceanic Modeling System). O ROMS é um modelo tridimensional de equações primitivas, em coordenadas sigma, de superfície livre 3D e com aproximações hidrostáticas e de Boussinesq (Peliz et al, 2007 ; Oliveira et al, 2009). O domínio estudado consiste no modelo ROMS –AGRIF, representando uma extensão da configuração utilizada por Peliz et al (2007) para a costa Oeste da Península Ibérica, entre as latitudes 34,5° N e 45,5° N e entre as longitudes 12,5° W e 5,5° W, com resolução horizontal de 1/27 (≈ 3 km) e 60 níveis verticais em coordenadas sigma. As condições fronteira e as condições iniciais deste domínio são retiradas via aninhamento “offline” de uma outra configuração de maior escala (domínio FD), que engloba o oceano Atlântico Nordeste, cujas condições iniciais consistem na climatologia mensal (Levitus, 1994), e as condições fronteira de acordo com a metodologia de Marchesiello et al (2001). As parametrizações para os forçamentos atmosféricos são feitas com base nos dados do sensor QUICKSCAT para os ventos e com base de dados de reanálises NCEP-2 (2009) para os outros parâmetros (pressão e temperatura à superfície, humidade relativa, radiação de longo e de curto comprimento de onda, fluxo de calor, evaporação e precipitação). Foi fornecida pela Doutora Rita Nolasco (CESAM) uma simulação para o período em análise da qual se extraíram os valores de temperatura ao nível da superfície do oceano para o domínio do modelo.

As metodologias utilizadas para calcular os valores climatológicos (média, desvios padrão e anomalia) e encontrar/fazer estatísticas dos filamentos das saídas do modelo são idênticas às das imagens de satélite. As diferenças residem na pré-selecção de imagens pois no modelo não existem dias em que a imagem é de má qualidade sendo possível utilizar dados de todos os dias. Nas estatísticas dos filamentos torna-se irrelevante representar a quantidade de imagens por intervalos de dias ou latitudes.

3.3 Ventos

Para ajuda na interpretação dos resultados e dado que o vento é o principal forçamento do afloramento costeiro, foram extraídos dados de vento da base de dados NCEP-2 (2009) para quatro pontos da sua grelha representativos da costa oeste da Península Ibérica nos meses de Junho a Setembro dos oito anos em estudo. São dados com intervalo temporal de 6 horas e os pontos encontram-se a 10 m de altitude, na longitude de 9.38°W e latitudes de 42.85°N, 40.95°N, 39.05°N e 37.14°N (ver as suas posições na figura 1, pontos a, b, c e d).

Foram ainda calculadas as médias mensais em cada ano das componentes meridional e zonal da tensão do vento em cada um dos quatro pontos apresentadas na figura 4 e as médias mensais em cada ano da tensão da componente meridional na figura 5. Figuras das séries anuais do vento nos oito anos encontram-se no anexo A e serão utilizadas na análise dos filamentos

Podem-se fazer algumas considerações preliminares a propósito do vento a partir das figuras 4 e 5, nomeadamente as direcções do vento são predominantemente de Noroeste, por

vezes de Nordeste e excepcionalmente de Sul. A tensão do vento incrementa-se em Julho relativamente a Junho, é máxima em Agosto e diminui em Setembro.

Há evidência de variabilidade interanual no campo dos ventos. A componente meridional do vento aumenta de Norte para Sul com algumas excepções como em 2006 e casos de semelhança em todas as latitudes como em Junho, Julho e Agosto 2005, Junho e Setembro 2007, Julho e Setembro de 2001 e 2002. Em Junho os ventos são fracos nos dois pontos a Norte em todos os anos enquanto nos pontos a Sul são fortes nos primeiros anos e gradualmente mais fracos nos anos seguintes até que são nulos em 2007 e de novo fortes em 2008. Para os meses de Julho e Agosto as duas latitudes a Norte têm componentes meridionais da tensão do vento díspares e a Sul semelhantes diferentes anos. Em Julho aparecem anos em que a componente meridional do vento é forte de Norte como 2002, 2006 e 2008, e anos em que é fraca nos dois pontos a Norte. No ponto mais a Norte em 2007 a tensão do vento chega a ser positiva nos meses de Junho e Julho. Em Agosto nos dois pontos a Norte a componente meridional do vento é forte de Norte nos meses de 2003, 2004, 2005 e 2006 e mais fraca nos outros. O mês de Setembro tem as menores amplitudes e baixa variação interanual das componentes meridionais de vento, encontrando-se as mais fortes de Norte nas duas latitudes a Sul no período de 2004 a 2008 e mais fracas nas duas latitudes a Norte no período de 2001 a 2004.

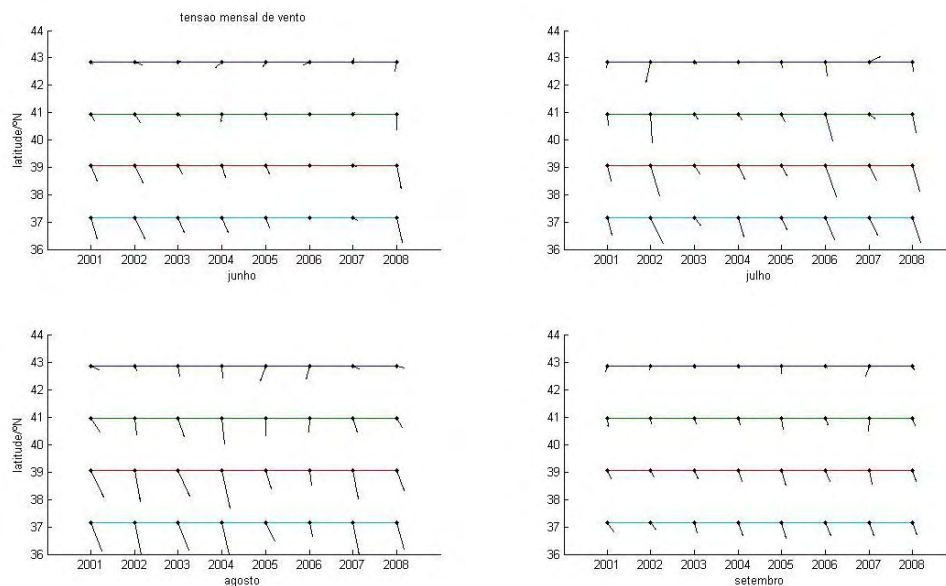


Figura 4. Médias mensais da tensão do vento resultante do NCEP2 (2009) em quatro pontos ao largo da costa Ibérica.

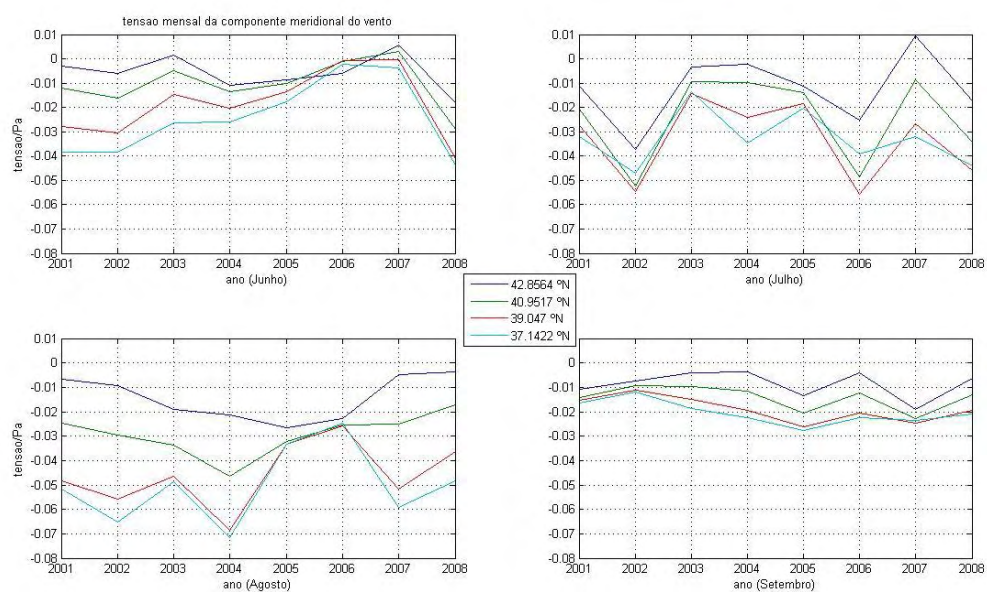


Figura 5. Médias mensais da componente meridional da tensão do vento resultante do NCEP2 (2009) em quatro pontos ao largo da costa Ibérica.

4. Resultados

4.1 Climatologias dos valores médios mensais de SST do Satélite e do Modelo

4.1.1 Comportamento geral

Na figura 6 são apresentadas médias dos oito anos para os meses de Junho a Setembro, onde se observa que ao largo da costa Oeste da Península Ibérica a temperatura da superfície do oceano aumenta de Junho até Agosto onde atinge um valor máximo diminuindo em Setembro. No entanto na plataforma continental, dentro da região de afloramento, a temperatura média mensal varia menos tendo valores entre 15,5°C e 18°C em diferentes pontos do domínio. Observa-se a temperatura mais baixa na plataforma continental do que ao largo devido ao afloramento de águas subsuperficiais mais frias. Existem regiões onde o afloramento é mais intenso, que se podem identificar como centros de afloramento, que estão localizados em pontos da costa onde a temperatura média é mais baixa situando-se por volta dos 43°N, 41°N até 42°N, 39°N e 37°N. Nestas latitudes estão incluídas as localizações dos principais acidentes topográficos costeiros nomeadamente Cabo Finisterra (43°N), região entre Cabo Carvoeiro e da Roca (39°N) e cabo S. Vicente (37°N).

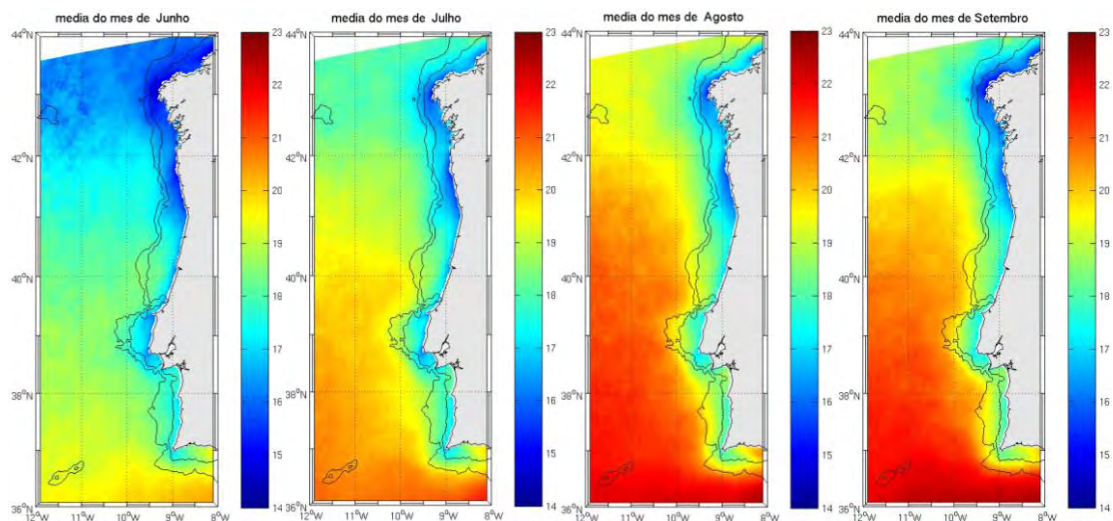


Figura 6. Médias mensais dos oito anos em estudo das imagens de satélite, em °C

4.1.2. Distribuição média do Satélite

Em Junho o gradiente de temperatura à superfície do oceano ao largo é negativo na direcção meridional próximo de zero na direcção zonal. Nos meses seguintes a componente zonal do gradiente aumenta com a intensificação do afloramento costeiro. Comparando o gradiente zonal de temperatura nas latitudes a Norte ao das latitudes a Sul (tabela 1) o maior gradiente zonal da temperatura da costa para o largo é observado a Norte e o menor a Sul em todos os meses. Porém entre 41°N e 42 °N encontra-se um centro de afloramento onde a diferença de temperaturas da costa para o largo é superior do que nas outras latitudes. Tal como os mapas das médias mostram (figura 6), a temperatura da frente de afloramento é inferior a 16°C apenas a Norte dos 41°N (Av), a Sul oscila entre os 17°C e os 18°C durante todo o Verão.

Tabela 1. Gradiente zonal da temperatura para os quatro meses do estudo entre pontos próximos da costa e 174 km afastados da costa à mesma latitude.

	Coordenadas: Finisterra: 43,0°N ; 11.4 °W Porto: 41,7°N ; 8,9 °W Sines: 38,0°N ; 8,8 °W	Gradiente (°C/km) x 10⁻³		Coordenadas: Finisterra: 43,0°N ; 11.4 °W Porto: 41,7°N ; 8,9 °W Sines: 38,0°N ; 8,8 °W	Gradiente (°C/km) x 10⁻³
Junho	Finisterra	11	Agosto	Finisterra	23
	Porto	16		Porto	27
	Sines	8		Sines	17
Julho	Finisterra	18	Setembro	Finisterra	20
	Porto	21		Porto	24
	Sines	13		Sines	19

4.1.3. Distribuição média do Modelo

Na distribuição média das SST simuladas pelo modelo dos oito anos nos meses Junho a Setembro, apresentada na figura 7, são observadas estruturas similares às do Satélite junto à costa com a excepção da dobragem do cabo de São Vicente, uma vez que aí a língua de água fria não é feita em cunha como no satélite. Um resultado recorrente é que a temperatura é mais baixa junto à costa no modelo do que nas imagens do satélite. Uma possível razão para este fenómeno tem a ver com o efeito do rotacional do vento na região costeira, que não é tomado em conta no forçamento do modelo dado que o forçamento do vento tem uma resolução de 1/4° [Capet et al, 2004], neste caso o quickscat não dá perfis de vento na zona costeira interior. A ausência de alta resolução (usualmente é de 3-5 km) na maior parte das simulações do vento nos modelos regionais atmosféricos tem como resultado a maior intensidade do vento costeiro face à realidade [Chelton et al, 2001].

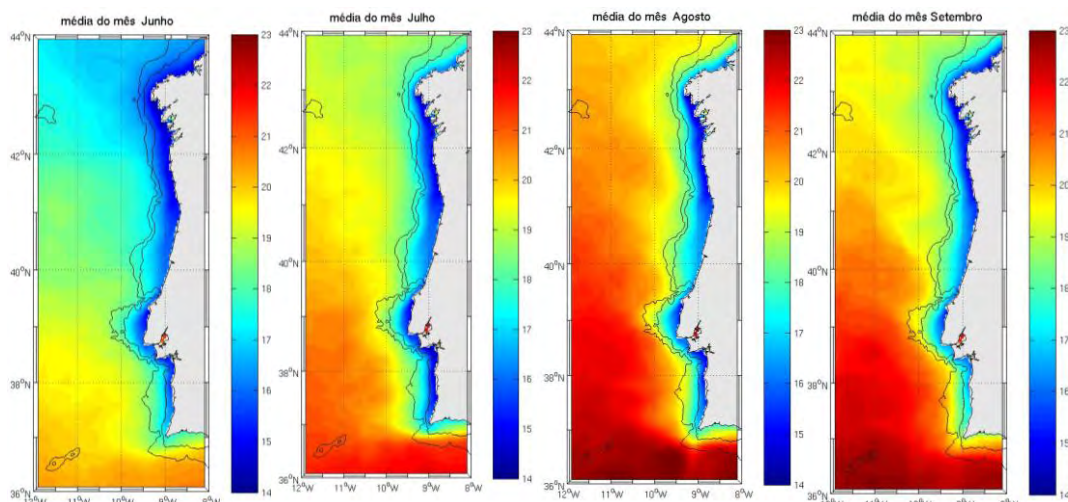


Figura 7. Médias mensais dos oito anos em estudo dos resultados do modelo, em °C

4.2. Climatologia dos desvios padrões do satélite e Modelo

A figura 8 apresenta os desvios padrões do satélite dos oito anos entre Junho e Setembro.

Em Junho o desvio padrão é maior na faixa entre 38°N e os 42°N entre a costa e o largo do que no resto da região a Oeste da Península Ibérica. Com o início do afloramento costeiro Junho é uma altura de transição entre o período de gradientes meridionais de temperatura fortes e o período de gradientes zonais de temperatura fortes. Na região de maior desvio padrão a transição pode ocorrer mais cedo ou mais tarde em anos diferentes de acordo com o início da época de afloramento costeiro, o que pode explicar esse comportamento

Nos meses de Julho, em que o afloramento está plenamente desenvolvido, e sobretudo Agosto a zona costeira é onde o desvio padrão é maior. Em torno dos 41°N (Av) o desvio padrão poderá estar associado à zona de transição na formação do centro de afloramento referido anteriormente. Quando num ano as condições são favoráveis ao afloramento costeiro intenso, a temperatura diminui mais junto à costa que ao largo com o afloramento das águas frias. Em anos de afloramento menos intenso as temperaturas ao largo não variam relativamente aos anos de afloramento intenso ao contrário da região junto à costa explicando assim o maior desvio padrão na região de afloramento. Em Agosto existem zonas de maior desvio padrão associadas a filamentos como em frente ao cabo Carvoeiro, Aveiro, Finisterra, Roca e São Vicente. A variabilidade interanual da presença de filamentos nessas zonas contribui para o desvio padrão.

Em Setembro o desvio padrão da Costa Oeste da Península Ibérica é reduzido. Nesta altura a frente de afloramento costeiro está formada em praticamente todos os anos com pouca variação na sua extensão. A Norte do Cabo Finisterra o desvio padrão é elevado pois existe uma forte variabilidade dos ventos (como é posto em evidência na figura 4).

Todos os meses apresentam elevado desvio padrão inter-anual na costa Sul Algarvia e isso deve-se ao variável regime anual de ventos dessa região que pode ser predominante de Este (Levante) e outros de Oeste (Poente) mas com anos de maior predominância de um em relação ao outro. O desvio padrão da temperatura da costa Sul Algarvia é gradualmente maior de Junho a Agosto e diminui em Setembro podendo ser explicado pela evolução diferente da circulação em cada ano nessa região. A temperatura na costa Oeste do Algarve (entre Lagos e S. Vicente) está fortemente controlada pela continuação do jacto de afloramento para Este, que por sua vez está associado à G.C.C. (corrente do declive do Golfo de Cádiz), descrita em Peliz et al (2007) e Peliz et al (2009).

A figura 9 apresenta os desvios padrões realizados para as saídas do modelo dos oito anos entre Junho e Setembro, e observa-se que a maioria das estruturas do desvio padrão é semelhante às do desvio padrão do satélite mas com valores mais acentuados. Tanto em Agosto como em Setembro são observadas zonas extensas de desvios padrões elevados com a possibilidade de estarem associados aos principais locais de formação de filamentos. Filamentos estão presentes ou ausentes a maioria dos anos nesses locais, com anos anómalos como é o caso de Agosto 2007 que contém um filamento ao largo do cabo São Vicente constantemente direccionado para Sul (como se irá constatar na secção 4.4.2) ao contrário da direcção Oeste/Sudoeste dos outros anos. Assim é observada uma linha de desvio padrão elevado com origem do cabo São Vicente em direcção a Sul.

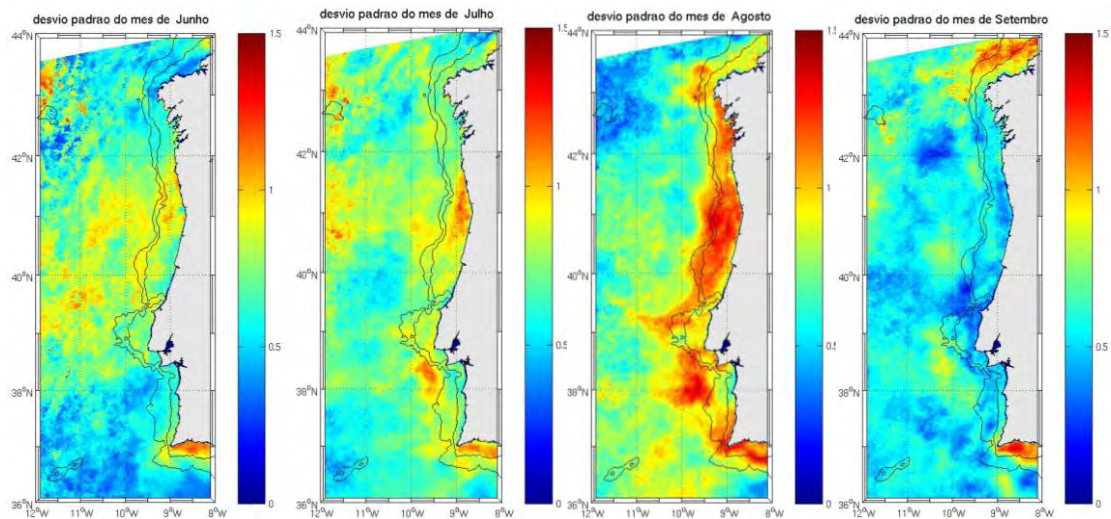


Figura 8. Desvio padrão mensal dos oito anos em estudo, imagens de satélite, em °C

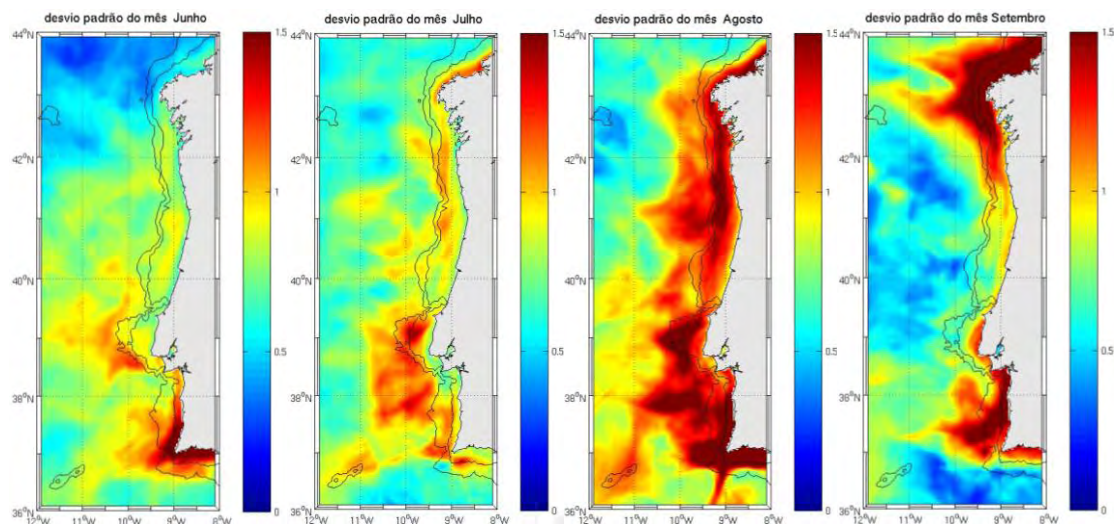


Figura 9. Desvio padrão mensal dos oito anos em estudo, resultados do modelo, em °C.

4.3. Variabilidade interanual da temperatura

De forma a estudar a variabilidade interanual do campo de temperatura foi calculado o desvio em relação à média apresentada nas figuras 10 e 11 para o período 2001 a 2008 para os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro. Os desvios dos meses de Junho e Julho são apresentados na figura 10 e os desvios dos meses de Agosto e Setembro são apresentados na figura 11. São analisados nesta secção alguns casos gerais e mais à frente serão aprofundados com outros resultados, respectivamente à análise dos filamentos.

O ano 2002 tem as maiores anomalias negativas (oceano mais frio) apresentando em todos os meses anomalias negativas em todo o domínio, situação que poderá estar relacionada com a prevalência de ventos fortes de Norte, observada nas figuras 4 e 5, em todos os meses de 2002 exceptuando Setembro em todas as latitudes.

O Verão de 2003 foi caracterizado por ter temperaturas do ar extremamente altas e com ventos de Norte anormalmente fracos de Junho a Agosto, o que explica as anomalias observadas da temperatura tendencialmente positivas. Entre Julho e Setembro de 2003 observa-se anomalia positiva da temperatura na região entre 38°N (Si) e 39°N (CR). Esta anomalia positiva afasta-se gradualmente da costa no decorrer dos três meses até que em Setembro se encontra uma anomalia negativa a Sul do Cabo da Roca entre a anomalia positiva e a costa.

No ano 2004 Junho e Agosto apresentam anomalias geralmente positivas e os meses de Julho e Setembro apresentam anomalias negativas na costa e positivas nalguns pontos offshore. Como se pode observar na figura de 2004 em anexo o vento é favorável ao afloramento em Julho (dias 180 a 200), finais de Agosto (dias 230 a 245) e em Setembro (a partir do dia 255), suficiente para gerar frentes de afloramento que são facilmente dissipadas nos períodos de relaxamento dos ventos como em Agosto.

Em Junho e Setembro de 2005 observam-se anomalias negativas na maioria dos locais excepto em Junho na costa Sul algarvia e em Setembro ao largo de Sines (38°N), junto ao cabo Finisterra (42,9° N) e ao largo da costa algarvia. Em Agosto são observadas anomalias negativas a Norte dos 39,3° N (CC) e positivas a Sul observando-se na figura 5 vento de componente Norte forte no mês de Agosto para os pontos a Norte da Figueira da Foz (40,1° N).

No ano 2006 a Norte dos 42°N (Vi) as anomalias da temperatura são ligeiramente negativas em Junho, Julho e Agosto, e positivas em Setembro observando-se na figura 5 vento de componente Norte forte (relativamente aos outros anos) no ponto mais a Norte apenas em Julho e Agosto. A Sul as anomalias da temperatura são positivas em Junho, Julho e Agosto, e nestes meses o vento de componente Norte dos dois pontos a Sul não é tão forte como noutros anos. Embora as anomalias no Sul em Setembro sejam maioritariamente negativas, observa-se uma positiva no promontório da Estremadura (38° N) e na plataforma continental em torno do Cabo S. Vicente (37° N) estendendo-se até por toda a costa Sul do Algarve.

No ano 2007 as anomalias são geralmente negativas com a excepção do mês de Julho que apresenta anomalias positivas a Norte dos 42°N(Vi), onde o vento tem sentido maioritariamente de Sul (figura 5), e em Setembro na Costa Sul Algarvia.

O ano 2008 no que respeita às anomalias da temperatura é um ano com poucos picos positivos ou negativos. Em Junho as anomalias são praticamente nulas em todo o domínio (excepto junto à costa Sul do Algarve que é negativo), em Julho têm tendência a ser mais negativas a Norte dos 42°N (Vi) e mais positivas a Sul. Em Agosto e Setembro é positivo a Norte dos 41°N e com tendência a ser negativo a Sul. As anomalias da temperatura positivas a Norte e negativas a Sul podem ser explicadas pela nortada forte a Sul e as frequentes mudanças no sentido do vento a Norte (figura A8 do anexo A).

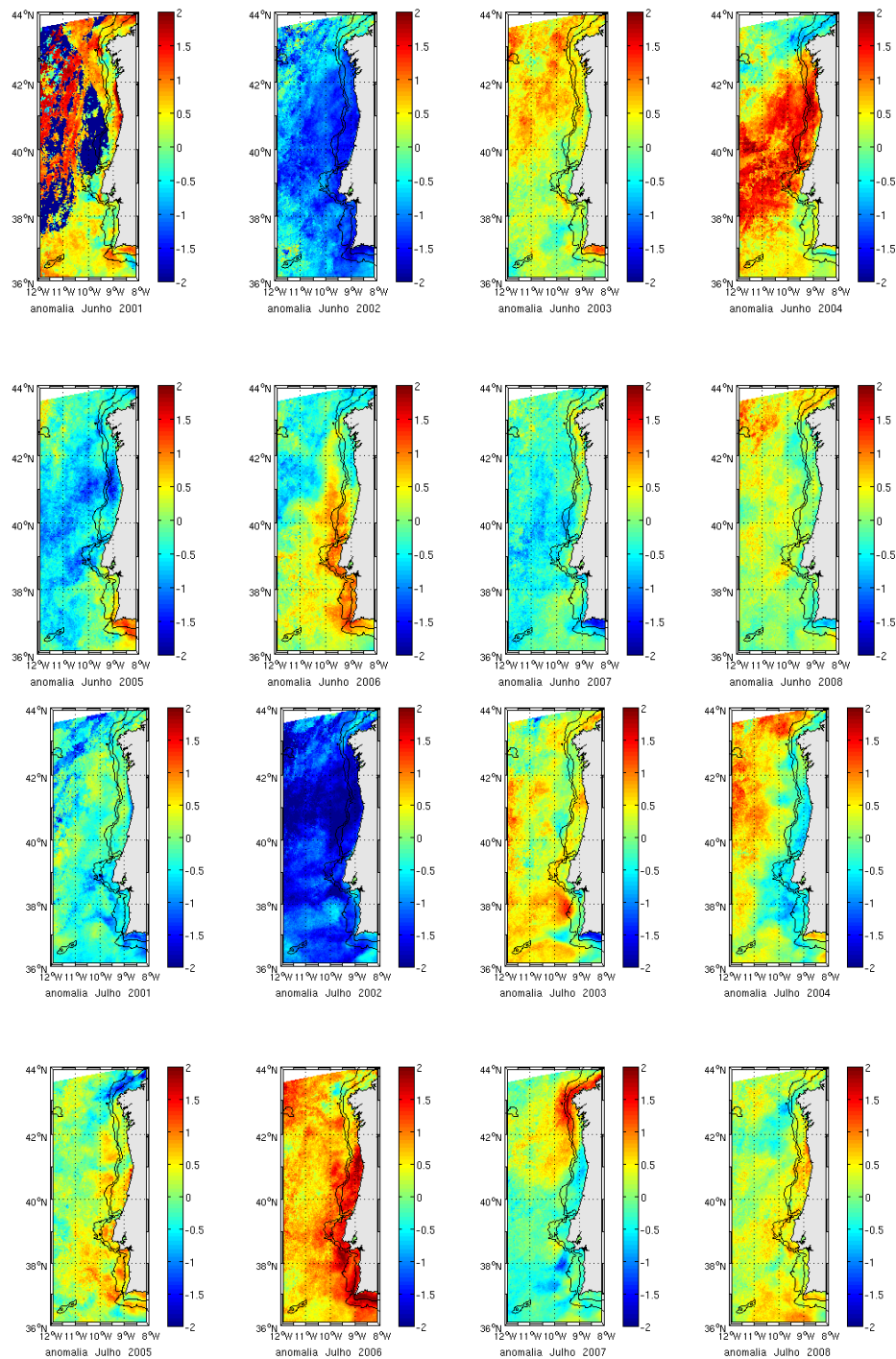


Figura 10. Desvios anuais em relação à média dos oito anos em Junho e em Julho.

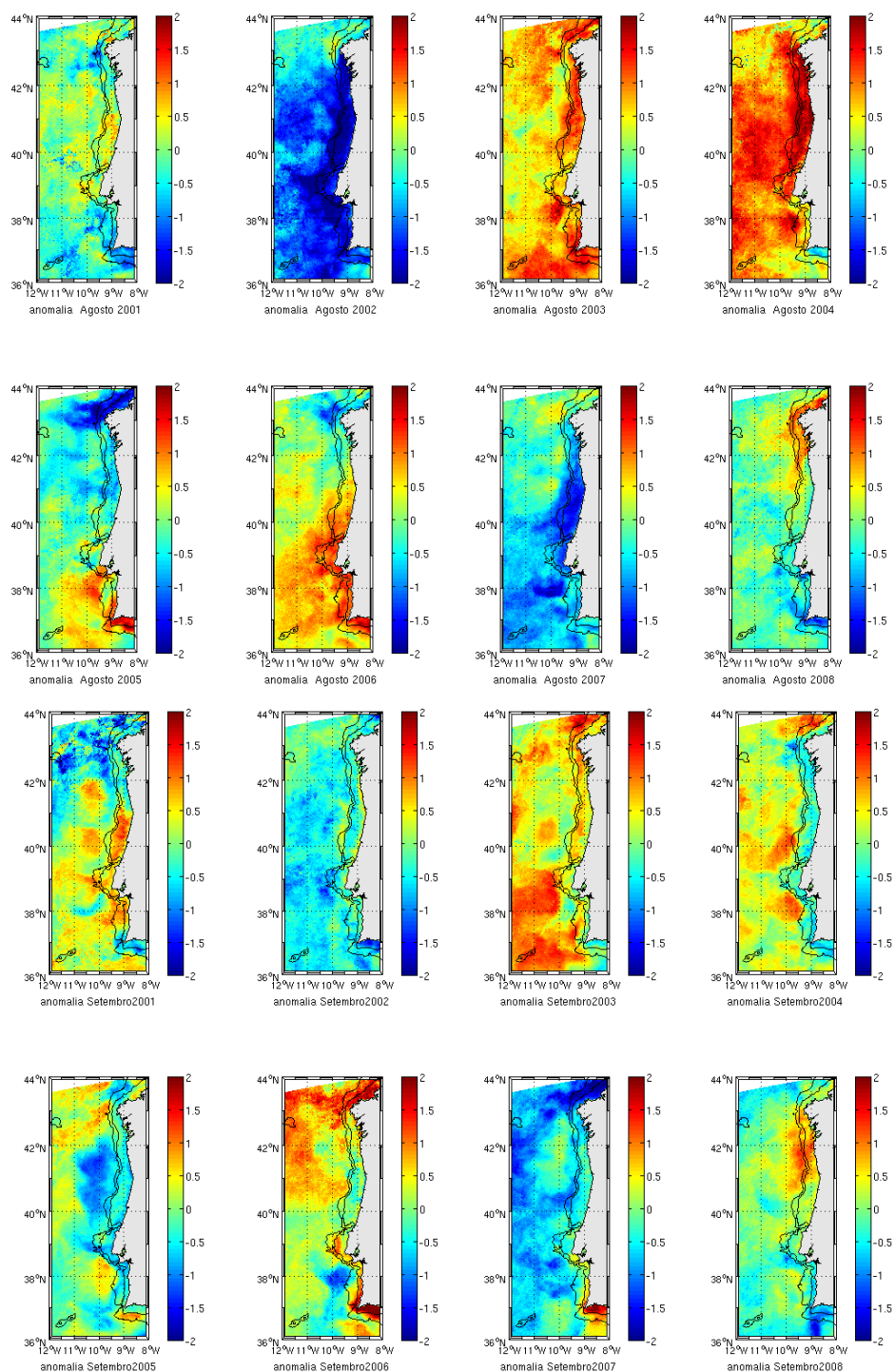


Figura 11. Desvios anuais em relação à média dos oito anos em Agosto e em Setembro.

4.4. Distribuição Espaço-temporal de filamentos de afloramento

A detecção dos filamentos apesar de tentar ser o mais objectivo possível contém elementos subjectivos, e dependentes do operador que faz a detecção dos filamentos. Por outro lado, no modelo, os filamentos observados comportam-se de forma estocástica, no sentido em que são gerados por processos de instabilidade internos no modelo, ou por processos de interacção topográfica, ou por interacções com os fenómenos de mesoescala modelados com a circulação na região costeira. Estes processos de mesoescala são controláveis pelas condições de fronteira lateral (podendo por exemplo introduzir vórtices pelas fronteiras), mas não são controláveis quando são gerados no interior do domínio, pelo que dificilmente se pode modelar estes na localização espacial e temporal sem fazer assimilação de dados, o que está fora dos objectivos das simulações efectuadas.

Sendo assim a distribuição de filamentos modelados e observados são comparáveis do ponto de vista estatístico, isto é, sem pretender que os mesmos filamentos sejam gerados na mesma localização e ao mesmo tempo. Esta comparação pretende dar algumas indicações da variabilidade sazonal e interanual da distribuição de filamentos ao longo da costa Oeste da Península Ibérica, pretende também estudar a existência de regiões nas quais raramente existem filamentos, e o outro extremo, regiões em que existem filamentos de forma recorrente.

Os filamentos foram estimados a partir de imagens de satélite disponíveis com a metodologia explicada no capítulo 3.1 e dos resultados do modelo ROMS referidos no secção 3.2. Foram utilizadas 686 imagens de satélite onde se observaram 1354 filamentos ao longo do período em estudo.

4.4.1. Estudo integrado da presença de filamentos

(a) Variação temporal do número total de filamentos para o período de oito anos

A figura 12 apresenta o número de filamentos encontrados entre 1 de Junho e 30 de Setembro em todos os anos de estudo nas imagens do satélite e a figura 13 apresenta o mesmo número de filamentos encontrados nas imagens do modelo. Na figura 12 observa-se um geral aumento do número de filamentos em cada intervalo de 5 dias entre início de Junho e meados de Agosto (dia juliano 230), formando-se anualmente, em média, um filamento em cada 12 dias. A partir de meados de Agosto a variação diária do número de filamentos não é significativa. Sobreposto a este padrão observam-se oscilações, que podem estar associadas ao tempo de vida de uma estrutura filamentar.

O número de imagens utilizadas aumenta até finais de Agosto coincidindo com o número máximo de filamentos.

Analisando a figura 13, o modelo apresenta maior número de filamentos pois as imagens contêm o desenvolvimento temporal dos filamentos ao contrário do satélite que normalmente

não aparecerem sequências contínuas de imagens com qualidade suficiente para se observarem filamentos. O mesmo filamento é então marcado repetidamente em cada sequência de imagens diárias. O pico máximo do número de filamentos observa-se nas duas primeiras semanas de Agosto (dias 215 a 230). Observam-se também oscilações com máximos relativos, que podem ser interpretados como ciclo de geração/decaimento de filamentos, com períodos de 15 dias.

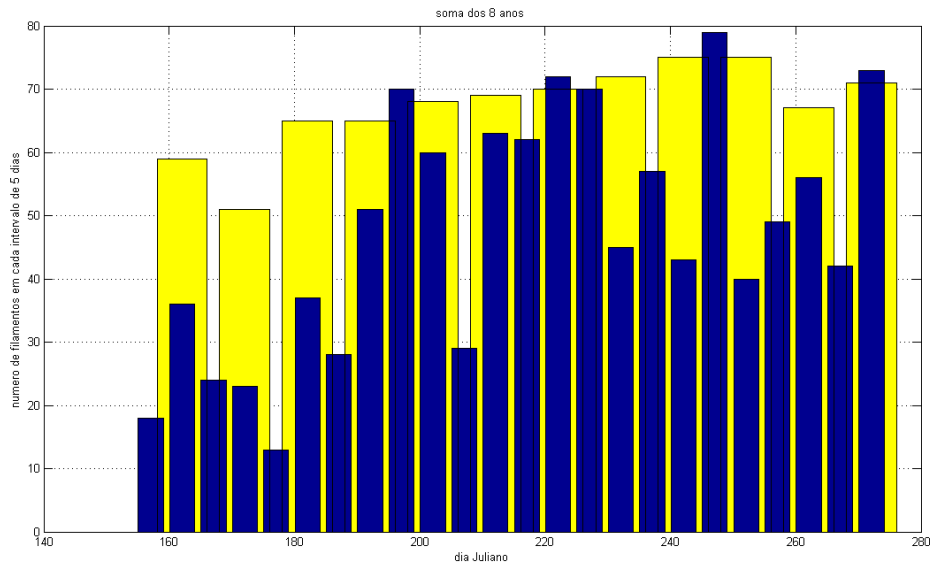


Figura 12. (Azul) número de filamentos observados nas imagens de Satélite em cada intervalo de 5 dias no período 2001 a 2008. (amarelo) número de imagens utilizadas na detecção de filamentos em cada intervalo de 10 dias no período 2001 a 2008.

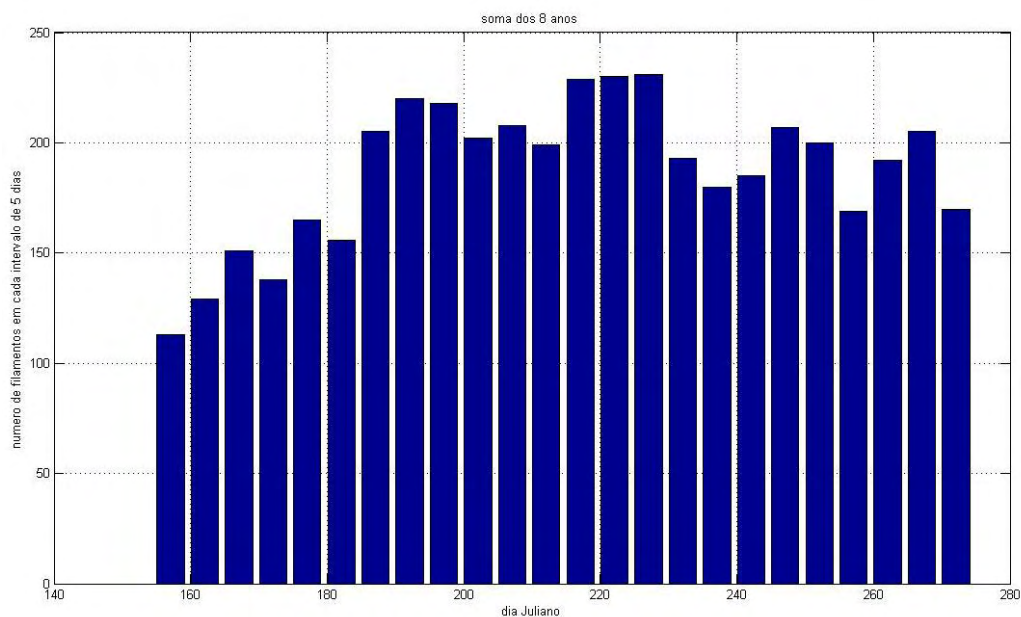


Figura 13. Número de filamentos observados nas imagens do modelo em cada intervalo de 5 dias no período 2001 a 2008.

(b) Variação temporal da média do comprimento de filamentos para o período em estudo.

A figura 14 apresenta o comprimento médio de filamentos encontrados entre 1 de Junho e 30 de Setembro do período 2001 a 2008 nas imagens do satélite e a figura 15 apresenta o comprimento médio de filamentos encontrados entre 1 de Junho e 30 de Setembro do período 2001 a 2008 nas imagens do modelo. Na figura 14 o comprimento médio dos filamentos tende a aumentar ao longo do Verão com valores máximos em meados de Julho (dia juliano 195) e início de Setembro (dia juliano 250). Estes máximos parecem coincidir com os máximos de número de filamentos (ver figuras 12 e 13), pelo que reforça a ideia da associação aos ciclos de geração e decaimento de filamentos. O comprimento máximo dos filamentos (amarelo nas figura 14 e 15) possui aumento mais significativo do que a média pois o número de filamentos aumenta durante o mesmo período (figura 12) e com isso existem mais filamentos de menor comprimento a contribuir para a diminuição da média dos oito anos em estudo. O intervalo entre dia 195 e 200 (14 e 19 de Julho) contém um máximo sendo o único filamento que atinge 150 km de comprimento antes do dia 220 (8 de Agosto) nos oito anos em estudo. Esse intervalo já foi caracterizado por possuir um máximo relativo no número de filamentos.

Os comprimentos dos filamentos observados pelo modelo seguem o mesmo padrão de evolução temporal que os comprimentos dos filamentos observados pelo satélite embora possuam comprimentos médios superiores. Os filamentos do modelo visualizam-se muito melhor pelo que no momento em que se marca o extremo do filamento se tem este em conta, enquanto na realidade este é muitas vezes diluído ou oculto por nuvens nas imagens do satélite.

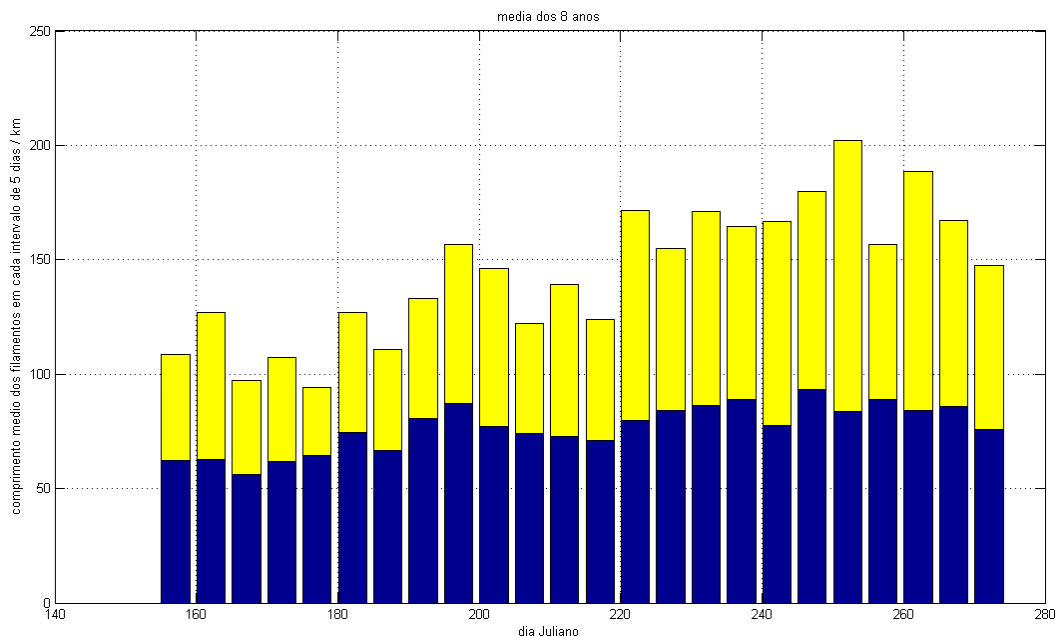


Figura 14. (azul) comprimento médio nos oito anos em estudo de filamentos observados nas imagens de satélite em cada intervalo de 5 dias. (amarelo) comprimento do maior filamento observado nas imagens de satélite ao longo dos oito anos em estudo em cada intervalo de 5 dias.

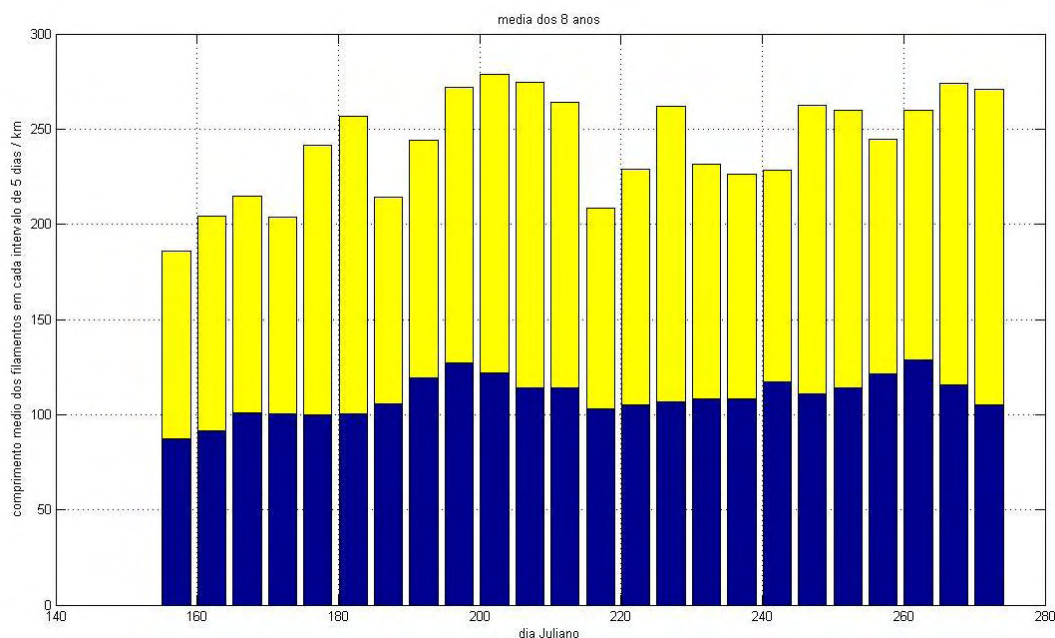


Figura 15. (azul) Comprimento médio dos oito anos em estudo de filamentos observados nas imagens do modelo em cada intervalo de 5 dias. (amarelo) comprimento do maior filamento observado nas imagens do modelo ao longo dos oito anos em estudo em cada intervalo de 5 dias.

(c) Distribuição espacial em latitude do número total de filamentos para o período de 8 anos

A figura 16 apresenta a distribuição do número de filamentos (em azul) observados nas imagens de Satélite para a costa Oeste Ibérica ao longo do período em estudo sobreposta à quantidade de zonas com menos de 25% de cobertura de nuvens (amarelo). Na figura 15 observa-se o número de imagens em geral crescente de Norte para Sul, com um máximo relativo entre 41°N e 42°N, e o absoluto entre 36°N e 37°N. A probabilidade de encontrar filamentos a Sul seria maior que a Norte se dependesse apenas da disponibilidade de imagens.

Encontram-se origens de filamentos em 3 localizações principais, e outras 3 secundárias. Cada localização principal engloba dois intervalos de latitude onde se encontram mais de 100 origens de filamentos nos oito anos situando-se nos 39.3°N (Cabo Carvoeiro, CC), 38°N (Cabo da Roca, CR) e 37°N (Cabo de São Vicente, SV). Os secundários situam-se aos 43°N (Finisterra, Fi), 41.2°N (Porto, Po), 37.9°N (Sines, Si) e encontram-se aproximadamente 50 filamentos num intervalo de latitudes. Os intervalos de latitudes adjacentes formam uma distribuição aproximadamente gaussiana com centro nos filamentos secundários. As origens dos filamentos secundários oscilam em latitude, não acontecendo com os filamentos principais que são fixos no que respeita à sua origem.

O filamento do Cabo Finisterra está associado ao estrangulamento que as águas do jacto de afloramento estão sujeitas ao passar pelo promontório associado ao Cabo Finisterra.

O filamento do Porto está não só associado ao afloramento costeiro intenso que se observa na região devido ao paralelismo entre a costa e o vento predominante (sentido de

Noroeste), como também à instabilidade do jacto de afloramento gerada na passagem pelo Cabo Finisterra. A sua direcção pouco varia ao passo que a latitude da sua origem é bastante variável.

O filamento com origem junto ao Cabo Carvoeiro foi estudado para o período de finais de Junho e inícios de Julho extensivamente por Oliveira et al (2009). É mostrado que este filamento surge fundamentalmente associado à separação do jacto de afloramento ao passar pelo promontório geográfico associado ao Cabo Carvoeiro e tem uma direcção bastante bem definida.

O filamento do Cabo da Roca está frequentemente associado à separação do jacto de afloramento associado à variação de 90° do ângulo da linha de costa a Sul do Cabo da Roca. A sua direcção é variável (discutida mais à frente).

O filamento de Sines está associado à separação do jacto de afloramento ao passar pelo promontório geográfico acoplado ao Cabo de Sines, e forma-se em situações de afloramento em que o filamento do Cabo da Roca não se estende para Sul.

O filamento do Cabo de São Vicente encontra-se sobretudo associado à separação do jacto de afloramento devido à variação de 90° do ângulo da linha de costa proporcionada pelo Cabo de São Vicente. A direcção deste filamento é variável podendo estar associada à circulação do Golfo de Cádiz.

A figura 17 apresenta a distribuição do número de filamentos observados nas imagens do modelo para a costa Oeste Ibérica ao longo do período em estudo. Apesar de estarem em escalas diferentes (o figura 16 relação à figura 17), os padrões obtidos são semelhantes nomeadamente junto a Finisterra, Porto e Cabo Carvoeiro. Existe um filamento recorrente nas imagens do modelo por volta dos 40° N (FF) que não se observa com frequência nas imagens do satélite.

Os filamentos extraídos do modelo aparecem em mais diversas latitudes, as suas origens vão-se deslocando meridionalmente nas sequências de imagens juntamente com os períodos de vento de Norte e de relaxamento do vento. Tanto o filamento do Cabo da Roca como o do Cabo de São Vicente já não aparecem com tanta frequência nos intervalos de latitudes observados no satélite, pois oscilam mais observando-se nos intervalos maior número nos intervalos adjacentes. Acontece também formarem-se filamentos únicos entre o Cabo da Roca e o Cabo Carvoeiro e entre o Cabo de São Vicente e Sines designando-os de filamentos da Estremadura e da costa alentejana respectivamente.

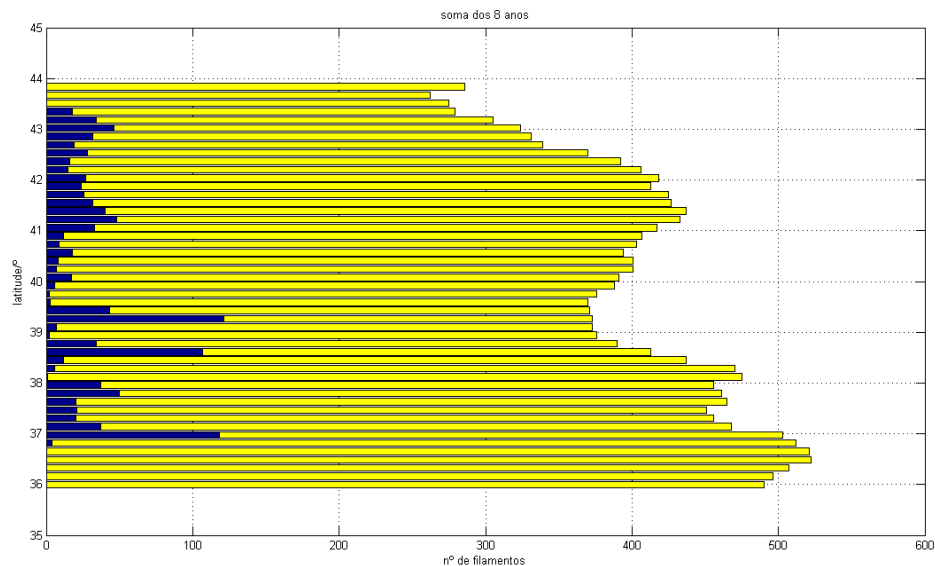


Figura 16. (azul) número de origens de filamentos observados nas imagens de satélite em cada um dos 50 intervalos de latitudes igualmente espaçados de $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N no período 2001 a 2008; (amarelo) número de imagens onde menos de 25% de cada intervalo de latitudes é composto por nuvens.

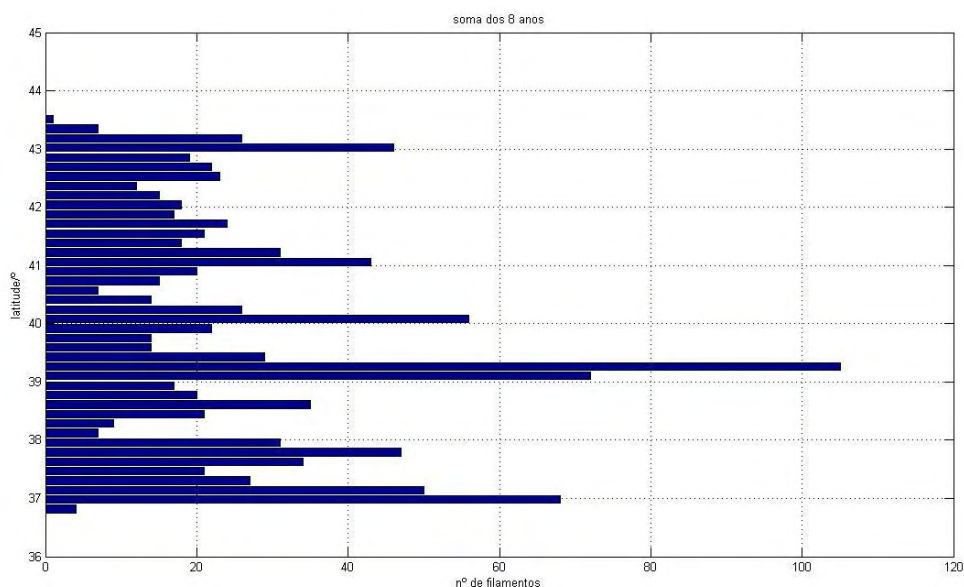


Figura 17. Número de origens de filamentos observados nas imagens do modelo em cada um dos 50 intervalos de latitudes igualmente espaçados de $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N no período 2001 a 2008.

(d) Distribuição espacial do comprimento

A figura 18 apresenta a distribuição espacial do comprimento médio dos filamentos no período em estudo observados nas imagens de satélite. A Norte dos 40°N (FF) os filamentos atingem comprimentos médios de 100 Km e a Sul atingem comprimentos médios de 80 Km. Existe uma região centrada em $39,5^\circ\text{N}$ onde os filamentos observados têm a dimensão mínima, associado ao filamento topográfico do Cabo Carvoeiro.

Observa-se no histograma de cor amarela da figura 18 que na região do promontório da Estremadura e da costa alentejana aparecem filamentos de 150 Km a 170 Km de comprimento. Em Aveiro (40,6° N) e Porto (41,1° N) chegam a atingir 180 Km a 200 Km. A Norte de 41.7° (VC) encontram-se filamentos com mais de 150 Km e menos de 180 Km de comprimento.

A figura 19 apresenta a distribuição espacial do comprimento médio dos filamentos do período em estudo observados nas imagens do modelo. Comprimentos médios no modelo são 50 a 100 km superiores que os observados pelo satélite. Pode-se estar a subestimar o tamanho dos filamentos observados pelo satélite pois os filamentos pequenos são mais detectáveis que os grandes. Um filamento maior tem maior probabilidade de ser ocultado por nuvens, assim quando uma parte do filamento estiver oculta por nuvens já não é contabilizado para a estatística. Por outro lado quando o mesmo filamento é marcado repetidamente em sequências de imagens conta como sendo vários para o cálculo da média. Estes filamentos que duram mais tempo acabam por atingir comprimentos elevados. No modelo todos os dias que esse filamento existe contam para o cálculo da média dos comprimentos enquanto no satélite os filamentos que contam são restringidos aos dias com imagens sem nuvens.

Em geral a estrutura compara-se razoavelmente bem em termos estatísticos, exceptuando o filamento da Figueira da Foz (40,1° N) que no modelo se observa com bastante frequência e nas imagens de satélite não se observa tão frequentemente.

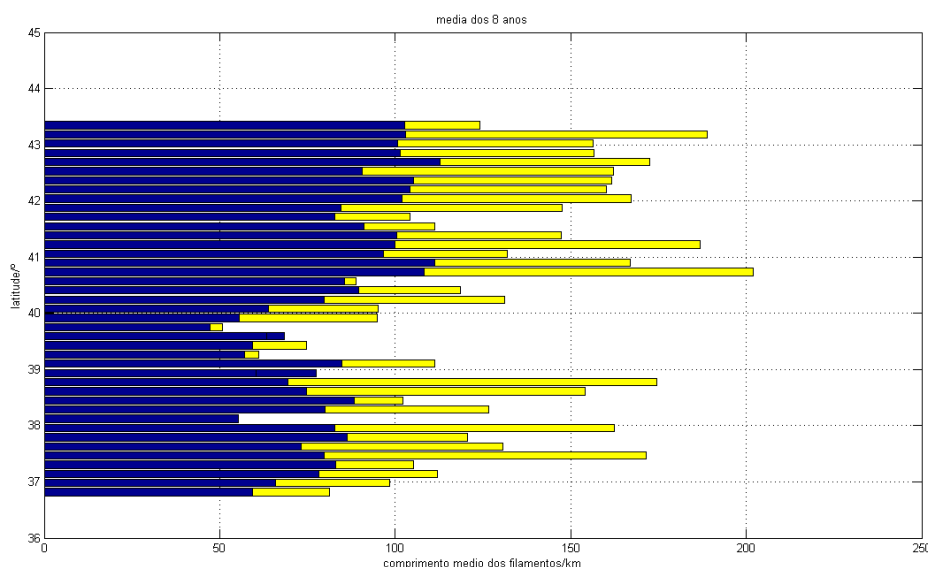


Figura 18. (azul) comprimento médio dos filamentos observados nas imagens de satélite em cada um dos 50 intervalos de latitudes igualmente espaçados de 0,16° entre 36°N e 44°N; (amarelo) comprimento do filamento máximo encontrado em cada um dos 50 intervalos igualmente espaçados entre 36°N e 44°N.

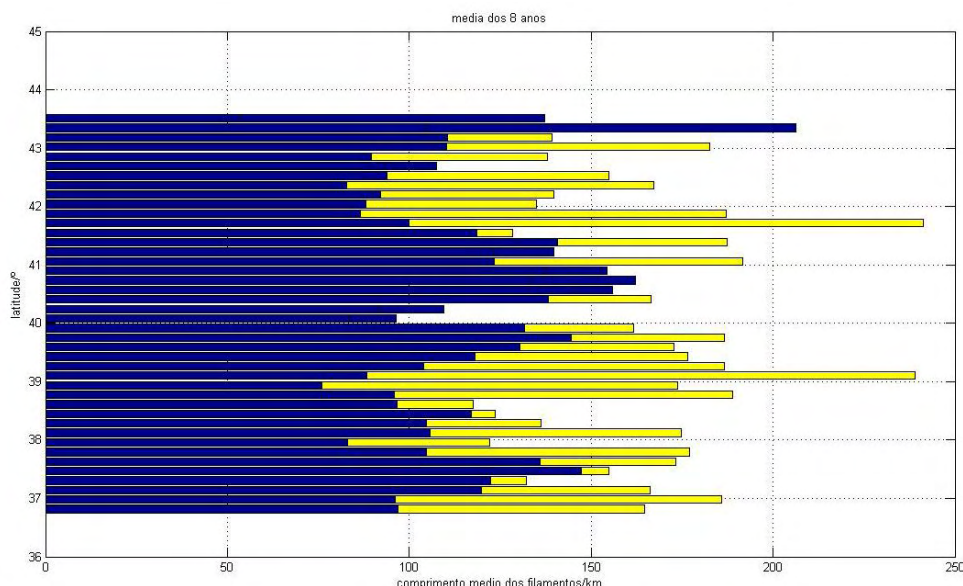


Figura 19. (azul) Comprimento médio dos filamentos observados nas imagens do modelo em cada um dos 50 intervalos de latitudes igualmente espaçados $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N ; (amarelo) comprimento do filamento máximo encontrado em cada um dos 50 intervalos igualmente espaçados de $0,16^\circ$ entre 36°N e 44°N .

4.4.2. Distribuição anual e meridional dos filamentos e suas direcções e comprimentos

A análise foi feita com base anual, apresentando as principais características, comparando os resultados da modelação com os das imagens de satélite, tendo em conta a distribuição mensal dos ventos nas figuras 4 e 5, séries diárias do vento em anexo e anomalias da temperatura mensais nas figuras 10 e 11.

Fazendo uma comparação visual entre os filamentos observados por satélite e modelados pode-se observar que há anos com uma boa comparação tais como 2002, 2007 e 2008, anos com comparações razoáveis tais como 2003 e 2006, e finalmente anos com mais fracas comparações tais como 2001, 2004 e 2005. Nesta secção são analisados detalhadamente os filamentos dos anos 2003, 2006 e 2007 para representar os anos com poucos filamentos (2003), anos mais típicos (2006) e anos com muitos filamentos (2006). A análise dos restantes anos do período em estudo encontra-se no anexo B.

Ano 2003: A figura 20 apresenta a distribuição anual e meridional dos filamentos registados ao longo do ano 2003, observados pelo (a) satélite e (b) modelo.

No ano de 2003 são observados poucos filamentos. Associado ao menor número de filamentos neste ano estão as anomalias da temperatura (figuras 10 e 11) que são geralmente positivas durante todos os meses, mais evidentes em Agosto e Setembro, e o vento que é geralmente fraco relativamente aos outros anos (figuras 4 e 5).

Na região a norte do Cabo Carvoeiro (39,3° N) praticamente não são observados filamentos tanto no satélite como no modelo durante o mês de Junho (até dia juliano 180). Este comportamento está associado ao fraco vento de Norte no mês de Junho, e às anomalias positivas da temperatura na região Norte em Junho.

No mês de Julho observa-se o aparecimento de uma banda de filamentos de Norte a Sul, excepto na região dos 40° N (FF). Ainda na região a Norte de 41° N os filamentos estão orientados para Su-sudoeste, aumentando a sua dimensão no mês de Agosto, e mantendo-se em Setembro.

Na região Sul, com excepção do filamento do Cabo Carvoeiro (39° N) e do Cabo de São Vicente (37° N) observa-se ao longo do Verão um número muito reduzido de filamentos, de acordo com a anomalia quente observada durante os meses de Julho e Agosto. No caso do filamento do Cabo de São Vicente é observado sobretudo em Julho diminuindo em Agosto e Setembro. O filamento está orientado para Oeste, estando a sua orientação associada a uma estrutura de água quente presente ao largo da região de Sines (38° N). Essa estrutura está representada na anomalia positiva da temperatura entre os 38°N (Si) e os 39°N (CR), e explica a escassez de filamentos nessa região.

O comportamento dos filamentos observados nas imagens do Modelo é razoavelmente similar aos filamentos observados nas imagens de Satélite, com excepção do filamento da Figueira da Foz (40° N), que é recorrente nas imagens do modelo e não se observa nas imagens de satélite. Observa-se também que o filamento do Cabo de Sines (38° N) ficou estacionário durante a maior parte do Verão nas imagens do modelo.

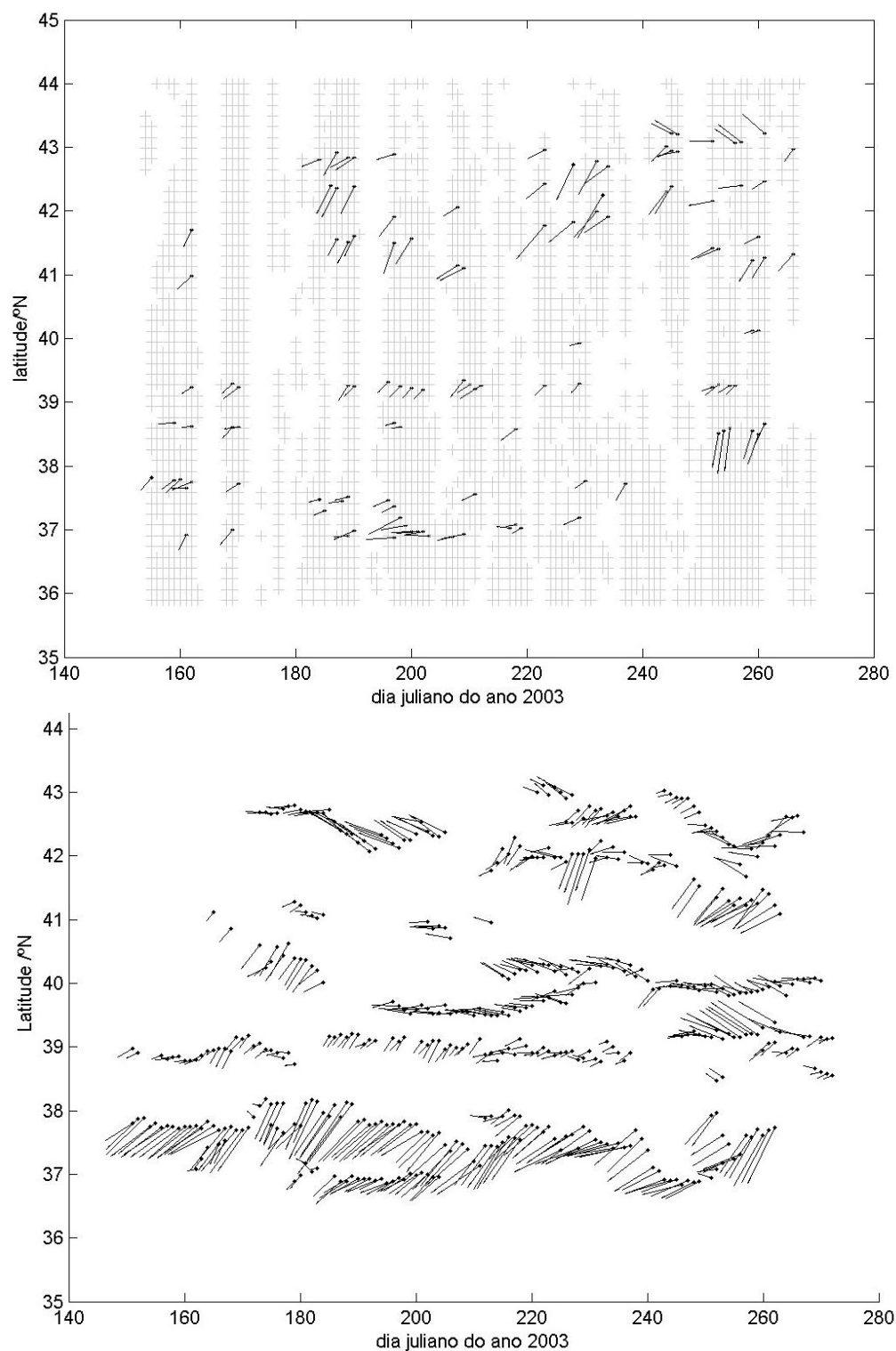


Figura 20. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica durante os meses de Verão do ano 2003. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.

Ano 2006: A figura 21 apresenta a distribuição anual e meridional dos filamentos registados ao longo do ano 2006, observados pelo (a) satélite e (b) modelo.

O ano de 2006 é considerado um ano típico no que respeita ao número de filamentos. Neste ano as anomalias da temperatura (figuras 10 e 11) são geralmente positivas, à excepção da região a Norte dos 41° N em Agosto e da região junto a Sines (38° N) em Setembro. O vento com sentido de Norte é fraco em Junho e Setembro mas forte em Julho e Agosto, observando-se assim maior número de filamentos nos meses de Julho e Agosto.

Em Junho observa-se pouca quantidade de filamentos e os que existem estão restringidos à região entre os 38° N e os 41° N. Em Julho o vento com sentido de Norte torna-se mais forte levando a formação de mais filamentos em todas as latitudes excepto aos 40° N. Por volta do dia 19 de Julho (dia juliano 200) o vento muda de direcção e relaxa (figura A6 do anexo A). Nos 15 dias seguintes encontra-se apenas o filamento de Sines (38° N) em toda a costa Oeste da Península Ibérica, e é o único período que é encontrado algum filamento a esta latitude no Verão de 2006.

Entre os dias 215 e 247 (3 de Agosto a 4 de Setembro) o vento com sentido de Norte proporciona uma série de imagens sem nuvens em todas as latitudes, excluindo os dias julianos 225 a 229 (13 a 17 de Agosto) em que se observa na figura A6 o vento com o sentido de Sudoeste. A Norte dos 40°N (FF) aparece uma banda de filamentos em que as origens dos filamentos se deslocam para Norte e os comprimentos dos filamentos aumentam ao longo do período entre os dias 215 e 247. No modelo de ROMS os filamentos a Norte de 41°N só aparecem em Julho e Agosto e também têm tendência a deslocar-se para Norte até que no início de Setembro o filamento com origem inicialmente a Norte dos 42°N é deslocado para Sul. Como se pode observar na anomalia da temperatura em Setembro (figura 11) aparece de água quente na costa Oeste da Galiza. Esse acontecimento é explicado pelo vento fraco no ponto a Norte, observado nas figuras 4 e 5.

A partir de meados de Setembro (dia juliano 260) o vento toma sentido de Sul em todas as latitudes deixando de se observar mais filamentos nas imagens de satélite. No Modelo ROMS embora se observem menos, não deixam de se observar os filamentos da Figueira da Foz (40,1° N), do Cabo Carvoeiro, de Sines e do Cabo de São Vicente, e a posição destes torna-se mais estável que nos meses anteriores.

Nas imagens do modelo ROMS os filamentos situam-se em locais semelhantes aos das imagens de satélite com excepção dos 40° N (FF) e dos 37° N (SV) que aparecem recorrentemente filamentos nas imagens do modelo mas são raros nas imagens de satélite. A forma como os filamentos do modelo ROMS se localizam dá a entender que as origens dos filamentos se deslocam para Sul quando o vento tem sentido de Norte e se deslocam para Norte quando o vento relaxa. O contrário aparenta acontecer a norte dos 41° N nas imagens de satélite mas é menos evidente.

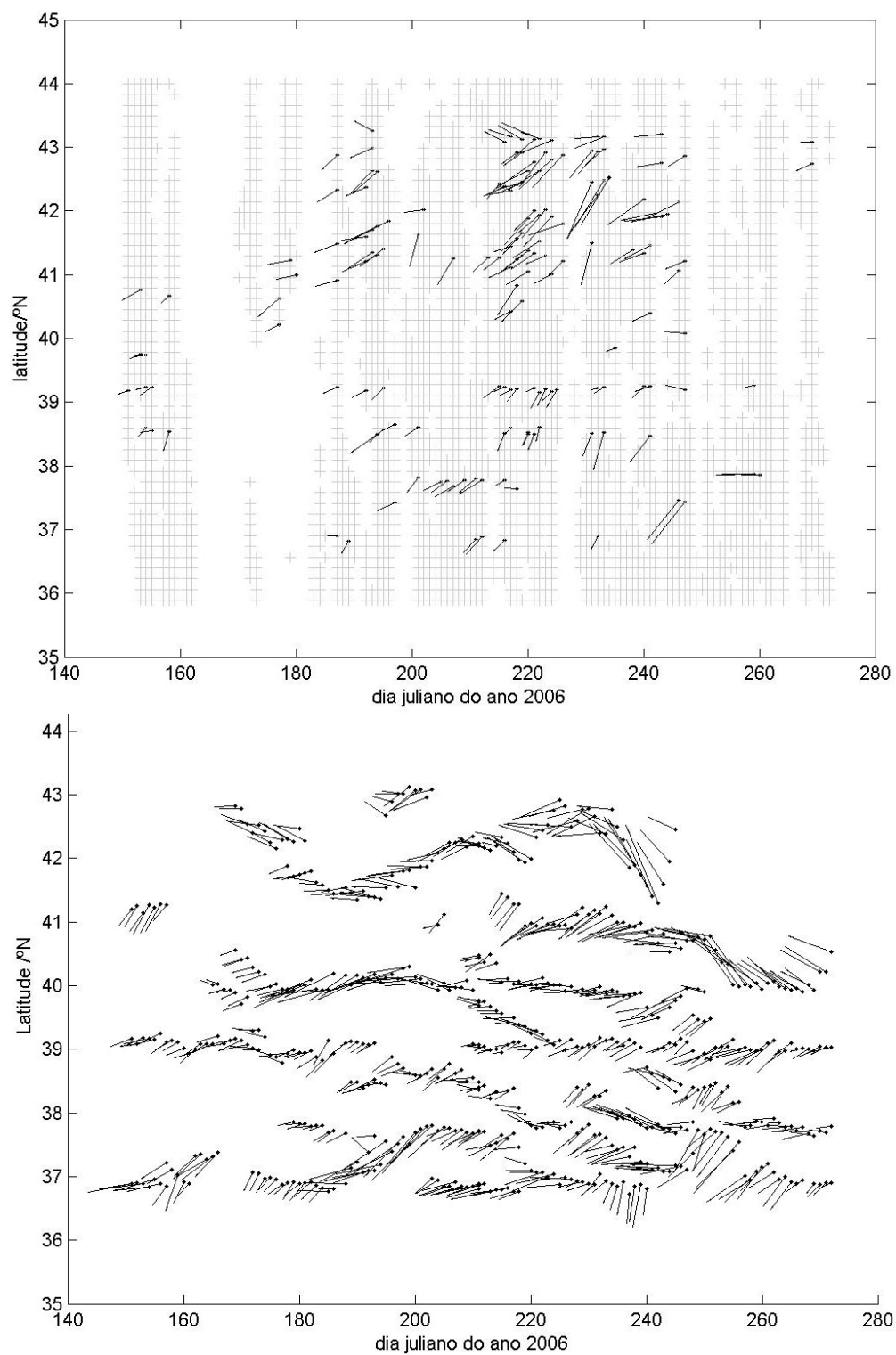


Figura 21. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica durante os meses de Verão do ano 2006. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.

Ano 2007: A figura 22 apresenta a distribuição anual e meridional dos filamentos registados ao longo do ano 2007, observados pelo (a) satélite e (b) modelo.

No ano 2007 é observado um número elevado de filamentos. Este acontecimento está relacionado com a estratificação causada pelos ventos fracos observados em Junho e Julho, especialmente a Norte (figuras 4 e 5). Como em Julho o oceano está muito estratificado para essa época do ano, o vento de componente de Norte gera um afloramento intenso. Agosto e Setembro têm ventos que se encontram dentro da média, ou seja, ventos de componente Norte que geram assim maior quantidade de filamentos. As anomalias da temperatura (figuras 10 e 11) são em geral negativas embora em Junho sejam próximas de zero e se encontrem anomalias positivas em Julho e Agosto a Norte dos 42° N e em Setembro na Costa Sul do Algarve.

Observa-se nas imagens de satélite que no decorrer do período em estudo se vão gradualmente encontrando filamentos mais a Norte. O vento só se torna favorável ao afloramento costeiro a Norte dos 42°N (Vi) a partir do início de Agosto, observando-se entrada de águas mais frias na costa Oeste da Galiza vindas da costa Norte da Península Ibérica, e porque o vento tem a direcção de Nordeste, o filamento do Cabo Finisterra tem orientação para Noroeste.

Em Junho de 2007 é raro observar-se algum filamento excepto em São Vicente (37° N). Em Julho encontram-se filamentos entre 36°N e 42°N pois o vento de Norte torna-se um pouco mais intenso a Sul de 42°N enquanto a Norte continua de Sul, tal como as anomalias da temperatura o fazia prever, positiva a Norte e negativa a Sul (figura 10). A partir do final do mês de Julho encontram-se filamentos em praticamente todas as latitudes incluindo entre Cabo Carvoeiro (39,3°N) e Aveiro (40,6° N) onde não é usual encontrar. O elevado número de filamentos observado a partir de Julho é consequência da interacção de ventos de Norte sobre o oceano, que é muito estratificado pelo facto de, em Junho, ter havido ventos anormalmente fracos.

Em Agosto ocorre um período de ventos de Norte intensos (por volta do dia 230, 18 de Agosto). Aos 40°N (FF) as anomalias da temperatura de Agosto são negativas e nesta região encontra-se recorrentemente um filamento.

O filamento do Cabo da Roca (38,8° N) adquire a direcção Su-sudoeste em Julho e Agosto, observando-se anomalia negativa de temperatura a Sul do Cabo da Roca na região dos 38°N (Si). A direcção do filamento está associada a uma estrutura de água quente situada a Oeste do Cabo da Roca podendo ser esta responsável orientação do filamento.

O padrão de desenvolvimento de Sul para Norte dos filamentos observados nas imagens de satélite está concordante com o dos filamentos observados nas imagens do modelo, encontrando-se algumas diferenças pontuais. Em Sines (38° N) aparece filamento direccionado para Oeste ocupando a região para onde o filamento da Roca (38,8° N) das imagens de satélite se estende. O filamento que se observa junto ao Cabo São Vicente (37° N) é direccionado para Sul a partir do dia 217 (5 de Agosto) nas imagens do modelo e direccionado para Oeste nas imagens de Satélite.

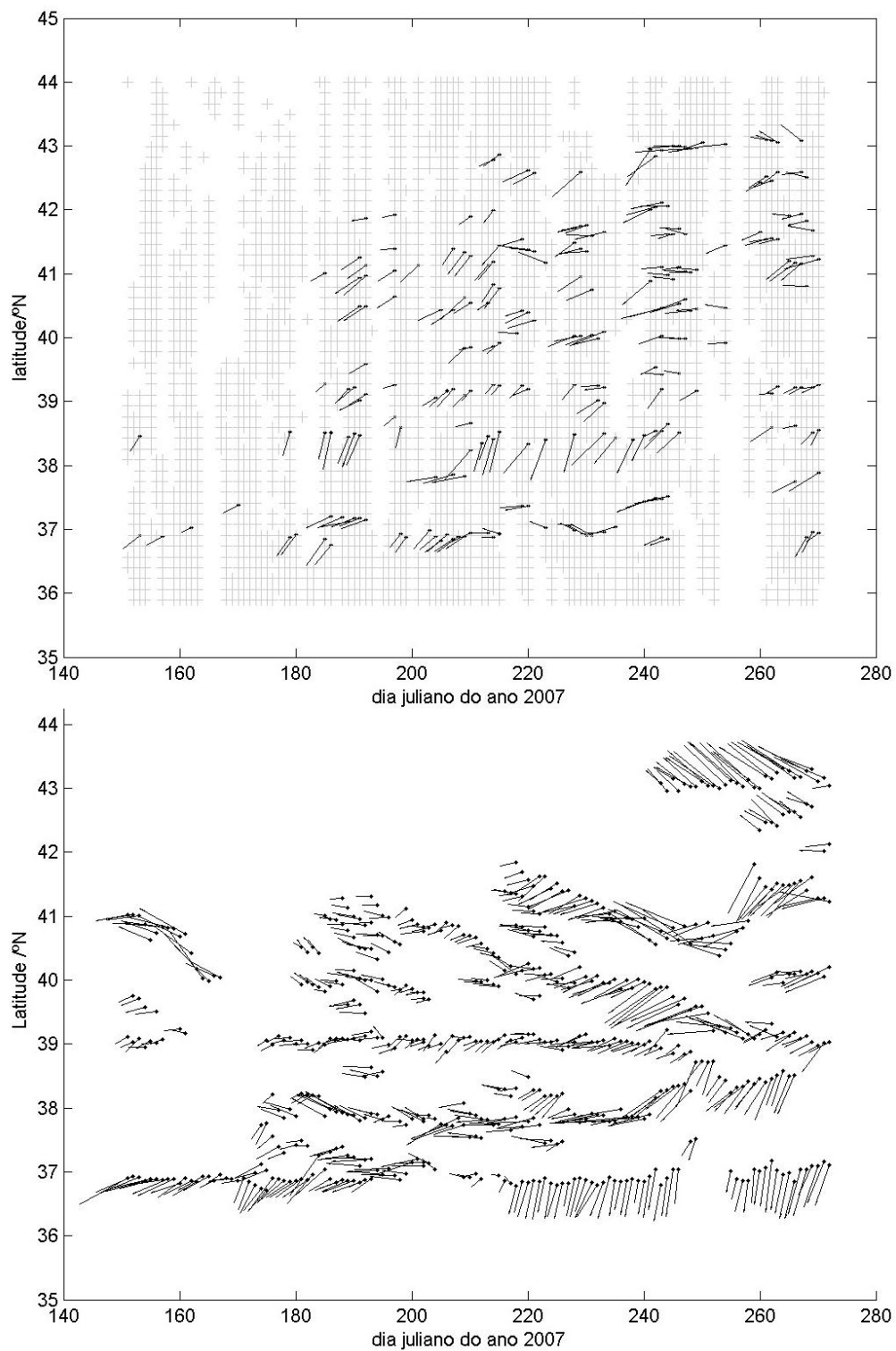


Figura 22. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica durante os meses de Verão do ano 2007. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.

5. Discussão

As imagens de satélite permitem fazer estimativas dos principais processos envolvidos na formação de filamentos. Pelas observações, o principal processo dinâmico envolvido na formação de filamentos é interação do sistema de afloramento com a batimetria, uma vez que a grande maioria dos filamentos estão associados a promontórios e cabos.

A partir das observações a formação de filamentos está associada a períodos de afloramento costeiro. Em anos que existem períodos prolongados de vento para o equador há maior tendência para a formação de filamentos junto à costa do que em anos que a direcção do vento varia de forma mais aleatória. Nas experiências de Narimousa e Maxworthy (1989) filamentos aparecem sempre que o sentido da circulação oceânica junto à costa está direccionado para Sul tal como acontece num cenário de afloramento costeiro na Costa Oeste da PI. A sua orientação é então esperada que seja para Sudoeste embora por vezes apareçam filamentos direccionados para Oeste ou até Noroeste em presença de processos de mesoescala oceânica como vórtices ciclónicos ou anticiclónicos.

A climatologia das médias da temperatura é representativa do sistema de afloramento da Costa Oeste da PI. Os desvios anuais a essas médias constituem as diferenças de comportamento da temperatura superficial do oceano em cada ano. Os valores apresentados pelos desvios estão de acordo com o regime de ventos e com a batimetria e topografia da costa. Estes desvios são então bons indicadores das principais localizações e épocas em que se observam filamentos para cada ano.

A Norte, junto ao Cabo Finisterra, os filamentos encontrados estão associados a cabos e à batimetria que se assemelha a uma crista submarina. Quando há corrente para o equador há divergência do fluxo sobre a crista forçando o fluxo a deslocar-se para fora da costa. A direcção do filamento por vezes está para noroeste. Aí é possível que seja devido à continuação do jacto costeiro quando há afloramento na costa Norte Ibérica, até porque a direcção do vento para Sudoeste em anos em que isso acontece (Agosto 2005, Setembro 2007) favorecem a ideia.

Entre Finisterra e a Figueira da Foz os filamentos que aparecem não estão associados a nenhum cabo específico, são provavelmente formados pelos processos de instabilidade iniciados pelos cabos da Galiza. É consistente com a modelação numérica e laboratorial de Narimousa e Maxworthy (1989) calculados em Haynes et al (1993) para a costa Oeste da Península Ibérica que determina a presença de ondas estacionárias entre 70 a 130 km a Sul dos Cabos da Galiza, aproximadamente até 41° N (Po). Na região entre 41° N e 42° N observa-se a frente térmica mais intensa da Costa Oeste da Península Ibérica (tabela 1), os filamentos observados na região são também associados à instabilidade desta frente

A Sul da Figueira da Foz os filamentos persistem junto aos principais cabos da região com o promontório da Estremadura a alojar um filamento à entrada (CC) e outro à saída (CR). O cálculo feito para o cabo Finisterra é feito também para o cabo da Roca em Haynes et al (1993) determinando-se a presença das suas ondas estacionárias associadas 80 a 170 km a Sul. São observados filamentos aproximadamente a estas distâncias a Sul do cabo coincidindo com a localização de dois grandes cabos (Si, SV). É portanto impossível de distinguir se estes filamentos se formam devido a instabilidades dinâmicas do fluxo forçados pela presença do cabo da Roca (ondas estacionárias) ou se são localmente forçados pela topografia.

A melhor hipótese para o processo dinâmico de formação de filamentos é a interação do sistema de afloramento com a batimetria. É possível que o filamento de São Vicente, especialmente quando tem a direcção Norte-Sul, seja apenas uma consequência da continuação do jacto para Sul associado ao afloramento tal como pode acontecer no cabo Finisterra quando está direccionado para Noroeste.

A comparação entre as estatísticas dos filamentos observados nas imagens do modelo e de satélite não revelou muitas diferenças. Quer seja quando se observam muitos filamentos nas imagens de satélite, quer seja quando se observam poucos, os filamentos do modelo tem tendência a seguir os mesmos padrões que os das imagens de satélite, não sendo necessariamente observados nos mesmos pontos. A única situação de divergência entre as imagens do satélite e do modelo encontra-se na região dos 40° N (FF) onde a presença de filamentos é recorrente nas imagens do modelo e rara nas imagens do satélite.

6. Conclusão

O período em estudo, meses Junho a Setembro dos anos 2001 a 2008, está incluído na época de afloramento costeiro habitualmente observado. Pode-se portanto esperar temperaturas da superfície do oceano inferiores junto à costa como de facto acontece no período em estudo na costa Oeste da Península Ibérica (PI). Uma frente térmica separa águas costeiras das águas do oceano aberto e coexiste com um jacto de afloramento dirigido para Sul na costa Oeste da PI. Instabilidade associadas à frente térmica ou interacções entre o jacto e os acidentes topográficos são os principais processos que estão na origem de filamentos de águas afloradas que se estendem da costa até ao alto mar, na Costa Oeste da PI. Em regiões adjacentes a acidentes topográficos da Costa Oeste da PI, nomeadamente o Cabo Finisterra ($42,9^{\circ}$ N), o Cabo Carvoeiro ($39,3^{\circ}$ N), o Cabo da Roca ($38,8^{\circ}$ N) e o Cabo de São Vicente (37° N), o principal processo de formação de filamentos é a interacção entre estes e o jacto para Sul. Esta conclusão é baseada na pouca variação da latitude dos filamentos observados junto a estes acidentes topográficos no período em estudo. Na Região entre o Cabo Finisterra e o Cabo Carvoeiro não se encontram acidentes topográficos de grande escala, no entanto observam-se filamentos em que as suas origens são muito variáveis anualmente. Estes filamentos são forçados pelas instabilidades associadas à frente térmica, mais intensa no Porto (41° N) onde se observa um grande número de origens de filamentos.

O número e a dimensão dos filamentos observados na Costa Oeste da PI aumentam de Junho até atingir as quantidades máximas e comprimentos na ordem dos 150 km em Agosto ou inícios de Setembro, quando começam a decrescer em tamanho e quantidade. Este comportamento é variável nos diferentes anos de acordo com o regime de vento, o principal gerador do afloramento. Esta variabilidade dos filamentos é acompanhada de elevada variabilidade da temperatura, principalmente em locais onde possam ter-se observado filamentos. Ao comparar os desvios em relação à média com médias mensais anuais do vento são muitas vezes antecipáveis as características dos filamentos ao longo do ano.

Este tratamento foi aplicado também com metodologias similares às saídas de um modelo numérico para o mesmo período. Os resultados estão de acordo com o esperado, ou seja, imagens de satélite e do modelo têm estatísticas semelhantes embora se encontrem pequenas diferenças locais. Uma situação contrastante encontra-se aos 40° N (FF) onde a presença de filamentos é recorrente nas imagens do modelo e rara nas imagens do satélite.

O processo de marcação dos filamentos, embora seja subjectivo devido à sensibilidade do operador, foi eficaz na obtenção dos resultados. Um método mais automatizado pode ser aplicado no futuro, a partir de métodos de detecção de frentes já utilizados.

7. Referências

- Barth, J. A., *Short-wavelength instabilities on coastal jets and fronts*, Journal of Geophysical Research – Oceans, vol. 99, I C8, pages 16095-16115, Aug 15 1994.
- Capet, X. J., P. Marchesiello, J. C. McWilliams, *Upwelling response to coastal wind profiles*, *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L13311, doi:10.1029/2004GL020123, 2004.
- Chelton, D. B., S. K. Esbensen, G. Schlax, N. Thum, M. H. Freilich, C. L. Gentemann, M. J. McPhaden, P.S. Schopf, *Observations of coupling between surface wind stress and sea surface temperature in the eastern tropical Pacific*, Journal of Climate, vol. 14, I 7, Pages 1479-1498, 2001.
- CMS, 2005. North atlantic regional sea surface temperature product manual. Mto-France Satellite Meteorology Center, Lannion, Brittany, France. SAF/OS/M-F/TEC/MA/124.
http://www.osi-saf.org/biblio/docs/ss1_pmnarsst_1_7.pdf
- Haynes, R., E. D. Barton, I. Pilling, 1993. *Development, Persistence, and Variability of Upwelling Filaments off the Atlantic Coast of the Iberian Peninsula*, Journal of Geophysical Research, vol. 98, No. C12, Pages 22681-22692, December 15, 1993.
- Levitus, S., R. Burgett, T. Boyer, World Ocean Atlas 1994, vol. 3, Salinity, NOAA Atlas NESDIS 3, NOAA, Silver Spring, Md, 1994.
- Marchesiello, P., J. C. McWilliams, A. F. Shchepetkin, *Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models*, Ocean Modell., 3, 1-20, 2001.
- Narimousa, S., T. Maxworthy, *Application of a Laboratory model to the interpretation of satellite and field observations of coastal upwelling*, Dynamics of Atmospheres and Oceans, 13 1-46, 1989.
- NCEP-2, 2009, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>
- Oliveira, P. B., N. Serra, A. F. G. Fiúza, I. Ambar, *A study of meddies using simultaneous in-situ and satellite observations*, In: D. Halpern, Editor, Satellites, Oceanography and Society, Elsevier Science B.V., Amsterdam, pp. 125-148 (chapter 7), 2000.
- Oliveira, P. B., R. Nolasco, J. Dubert, T. Moita, A. Peliz, *Surface temperature, chlorophyll and advection patterns during a summer upwelling event off central Portugal*, Continental Shelf Research, vol 29, numbers 5-6, ISSN 0278-4343, pages 759-774, 30 March 2009
- Peliz, A., A. Teles-Machado, P. Marchesiello, J. Dubert, J. Garcia Lafuente, *Filament generation off the Strait of Gibraltar in response to Gap winds*, Dynamics Ocean and Atmosphere, 46, 36-45, doi: j.dynatmoce.2008.08.002, 2009.

- Peliz, A., T. L. Rosa, A. M. P. Santos, J. L. Pissarra, *Fronts, Jets, and counter-flows in the Western Iberian upwelling system*, Journal of Marine Systems, 35, 61-77, 2002.
- Peliz, A., J. Dubert, A. M. P. Santos, P. B. Oliveira, B. L. Cann, *Winter upper ocean circulation in the Western Iberian Basin, Eddies and Poleward Flows: an Overview*, Deep-Sea Research I 52 621-646, 2005.
- Peliz, A., J. Dubert, P. Marchesiello, A. Teles-Machado, *Surface Circulation in the Gulf of Cadiz: Model and Mean Flow Structure*, Journal of Geophysical Research, 112, C11015, doi:10.129/2007JC004159, 2007.
- Santos, A.M.P., A. Peliz, J. Dubert, P.B. Oliveira, M.M. Angélico, P. Ré, *Impact of a winter upwelling event on the distribution and transport of sardine eggs and larvae off western Iberia: A retention mechanism*. Continental Shelf Research. 24, 159-155, 2004.
- Saunders, P. M., *Circulation in the eastern North Atlantic*, J. Mar. Res., 40, 641-657, 1982

Anexo A

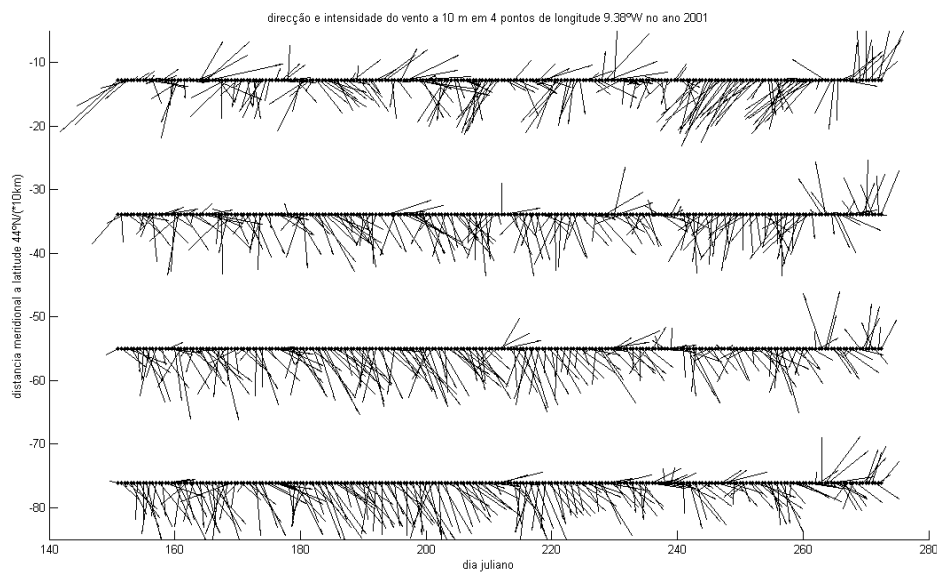


Figura A 1. Série temporal do vento extraído da base de dados do NCEP2 no ano 2001.

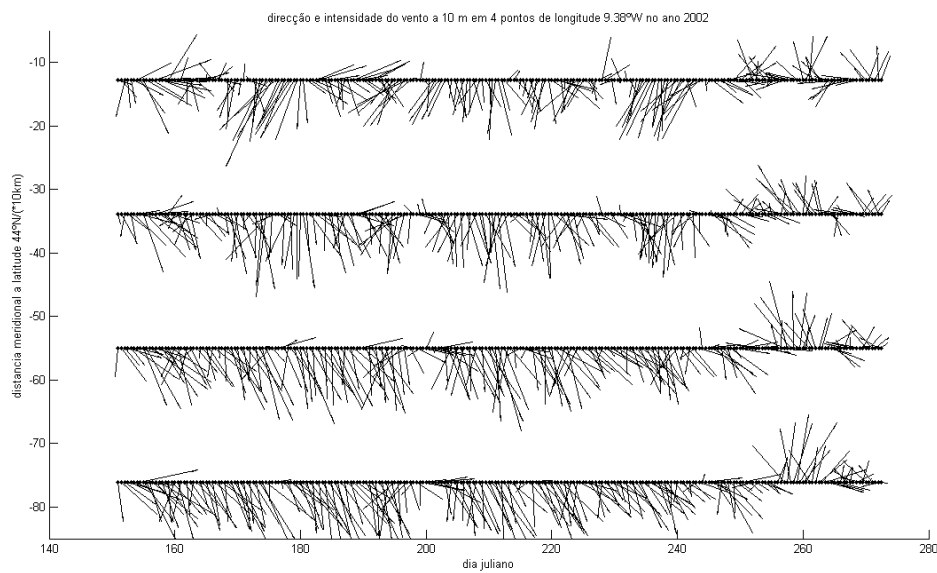


Figura A 2. Série temporal do vento extraído da base de dados do NCEP2 no ano 2002.

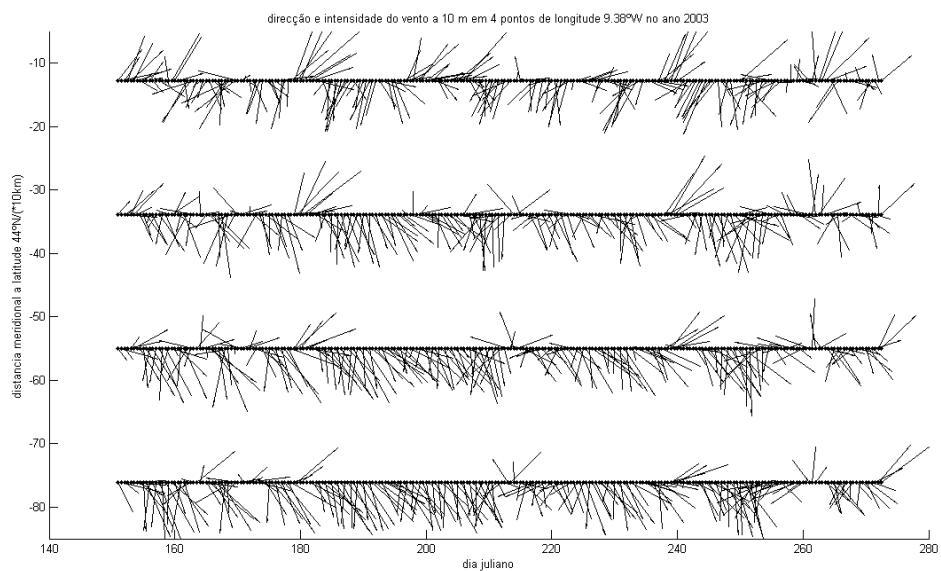


Figura A 3. Série temporal do vento extraído da base de dados do NCEP2 no ano 2003.

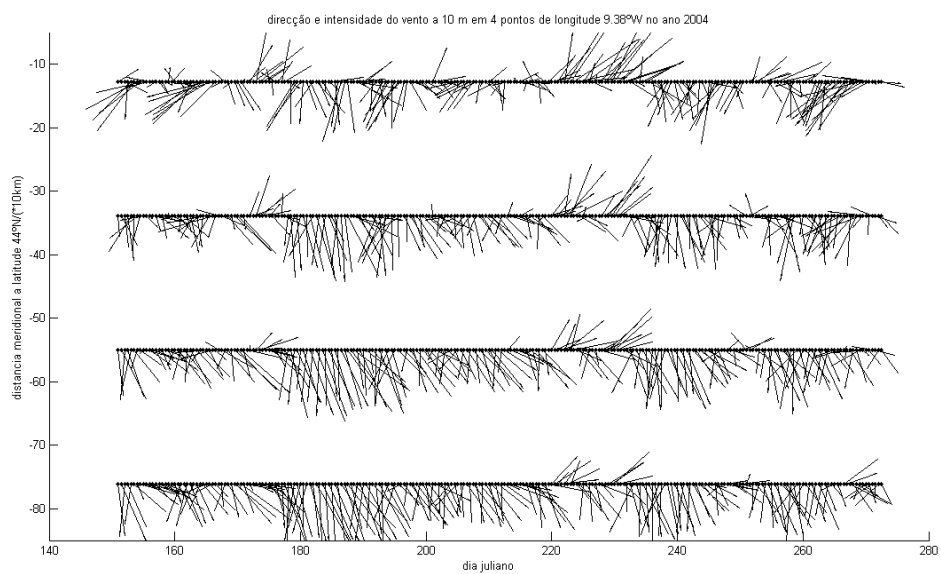


Figura A 4. Série temporal do vento extraído da base de dados do NCEP2 no ano 2004.

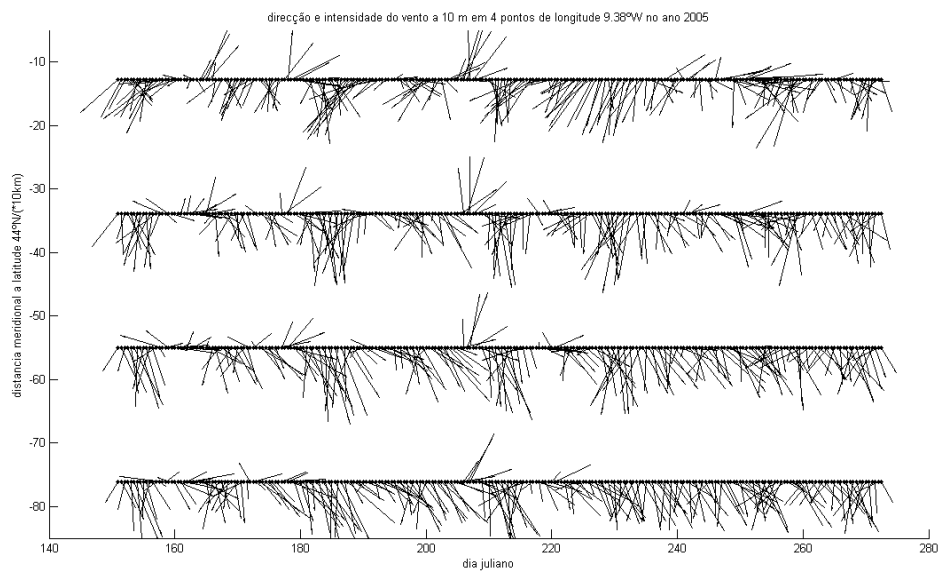


Figura A 5. Série temporal do vento extraído da base de dados do NCEP2 no ano 2005.

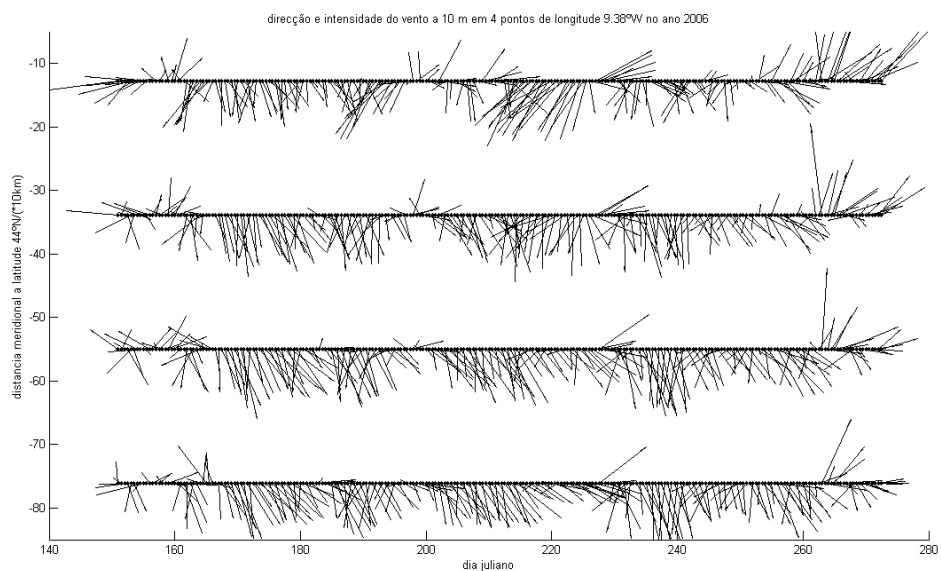


Figura A 6. Série temporal do vento extraído da base de dados do NCEP2 no ano 2006.

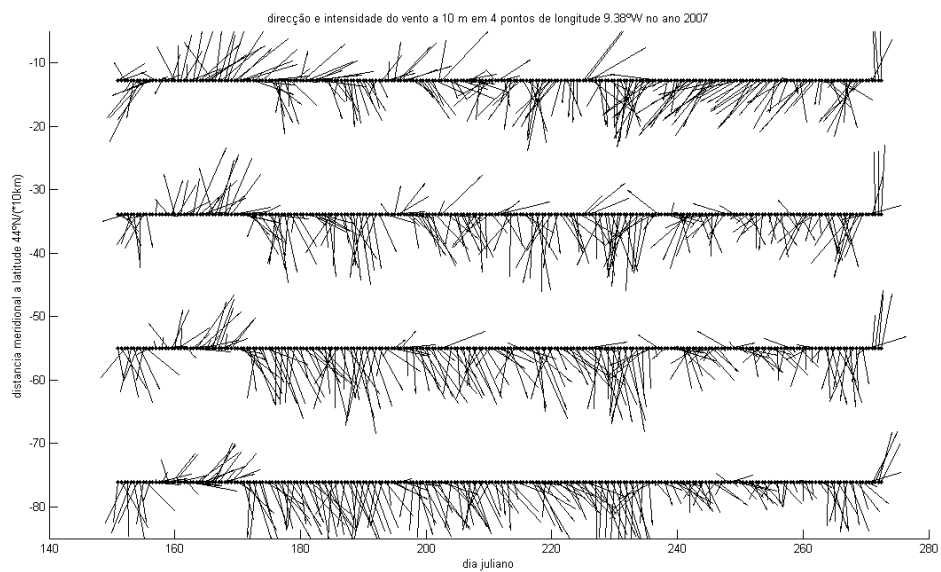


Figura A 7. Série temporal do vento extraído da base de dados do NCEP2 no ano 2007.

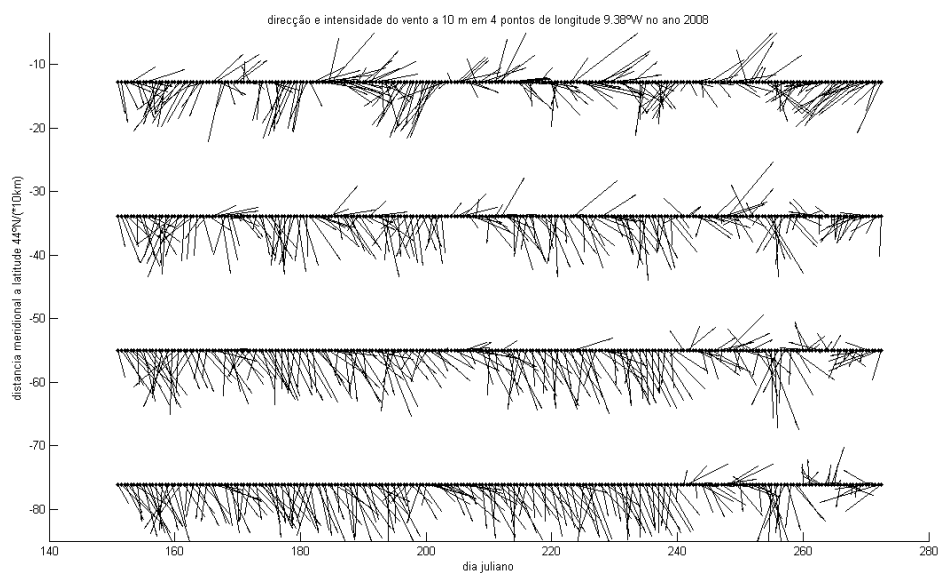


Figura A 8. Série temporal do vento extraído da base de dados do NCEP2 no ano 2008.

Anexo B

Ano 2001: A figura 20 apresenta a distribuição anual e meridional dos filamentos registados ao longo do ano 2001, observados pelo (a) satélite e (b) modelo.

Este ano apresenta baixa disponibilidade de imagens sendo maior a entre os dias 240 e 260, 210 e 220, 174 e 180. Por esta razão, não se sabe ao certo se esta distribuição de filamentos está afectada pela presença de nuvens. No geral os comprimentos dos filamentos vão aumentando à excepção do período do dia 220 (8 de Agosto) até ao dia 240 (28 de Agosto) que está relacionado com o relaxamento da componente meridional do vento durante esse período observado na figura A1 do anexo A.

Ao longo de todos os meses não se encontram filamentos entre o Cabo Carvoeiro e Aveiro distinguindo-se a região a Norte da região a Sul. A Norte a quantidade de filamentos aumenta de Junho a Setembro e a Sul diminui gradualmente. No que respeita ao vento nos dois pontos a Norte, a intensidade da componente meridional aumenta gradualmente enquanto que nas latitudes a Sul ocorre o oposto, diminui gradualmente até se anular, como se pode observar na figura A1 do anexo A. Observa-se nas figuras 10 e 11 as anomalias positivas da temperatura a deslocar-se de Norte para Sul ao longo do Verão de 2001.

A Norte aparecem filamentos nas latitudes do cabo Finisterra ($42,9^{\circ}$ N) e Porto ($41,1^{\circ}$ N) durante todo o período, e em Viana do Castelo ($41,7^{\circ}$ N) a partir de Agosto. A diminuição da intensidade da componente meridional do vento na segunda metade de Agosto (dias julianos 220 a 240) resulta na existência de menos imagens sem nuvens e consequente falta de filamentos. No modelo ROMS durante este período aparece um filamento cuja origem se vai deslocando para Sul ao longo do tempo e que a sua direcção vira para Norte. Poderá então relacionar-se a falta de filamentos apenas com o facto de ter ventos fracos e não com a falta de imagens. A partir de início de Setembro, os mesmos filamentos encontrados anteriormente voltam a aparecer a Sul, e as suas origens vão-se deslocando para Norte até que no dia 260 deixam de aparecer imagens sem nuvens.

A Sul encontram-se filamentos nas latitudes dos cabos Carvoeiro ($39,3^{\circ}$ N), Roca ($38,8^{\circ}$ N), Sines (38° N) e São Vicente (37° N). O filamento do Cabo Carvoeiro aparece virtualmente sempre, o da Roca não aparece no período de 190 a 210 (Julho), o de Sines deixa de aparecer a 220 (10 de Agosto) e o de S. Vicente não aparece entre 208 a 234 (Agosto). A presença de filamentos apresenta tendência contrária ao sector Norte diminuindo até finais de Agosto e ficando constante em Setembro.

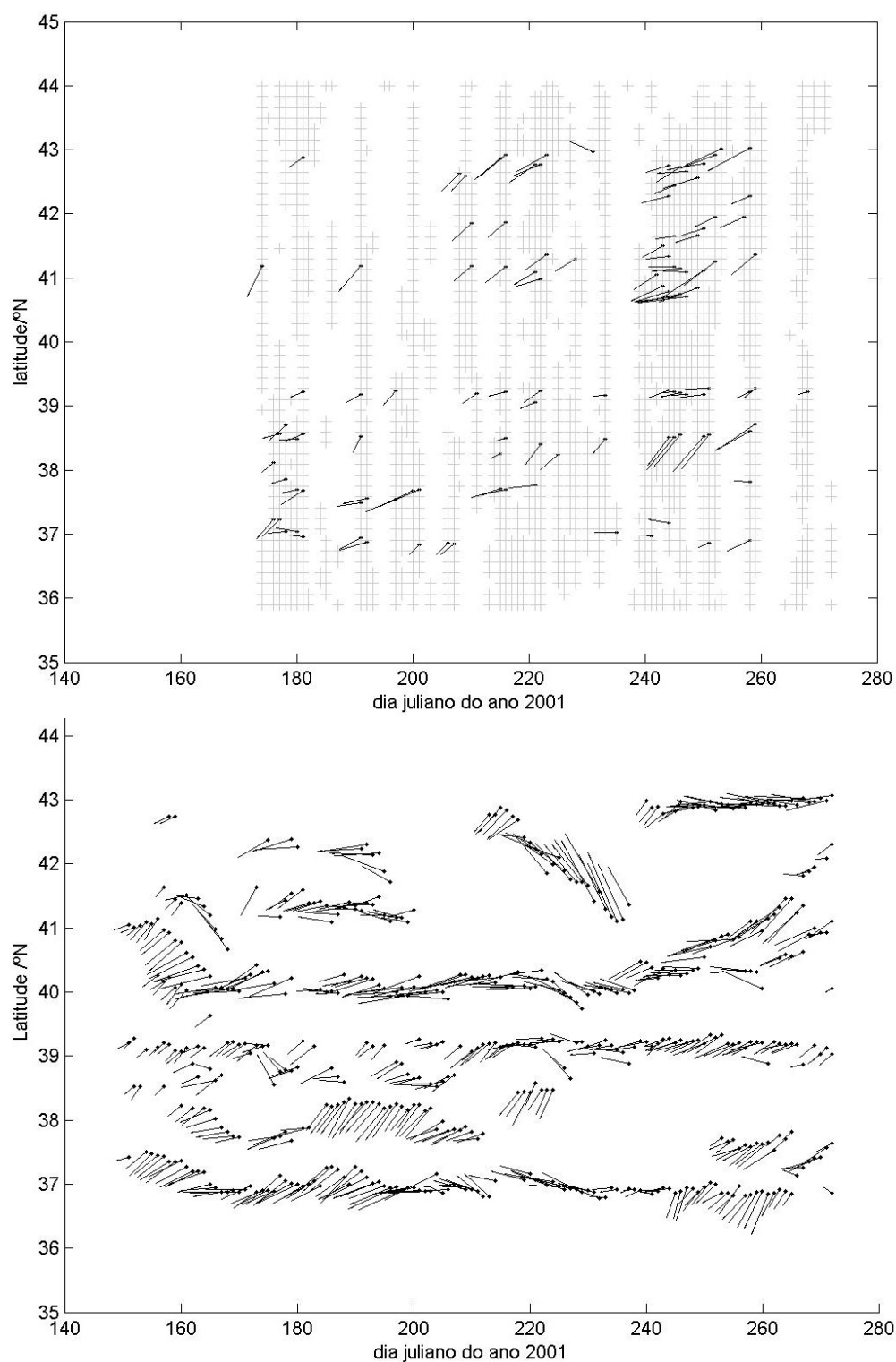


Figura 1. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.

Ano 2002: A figura 21 apresenta a distribuição anual e meridional dos filamentos registados ao longo do ano 2002, observados pelo (a) satélite e (b) modelo.

O ano 2002 apresenta um reduzido número de filamentos mas os filamentos observados têm comprimentos geralmente elevados. Este ano apresenta anomalias de temperatura negativas em todo o domínio (figuras 10 e 11) e os ventos têm a componente de Norte forte de Junho a Agosto e fraca em Setembro (figuras 4 e 5).

Durante o mês de Junho não se observam filamentos. Uma razão para esse acontecimento prende-se com a fraca estratificação do oceano, devido ao afloramento intenso de águas frias, criado pelos ventos de Norte fortes em Junho.

Na figura A2 do anexo A observa-se que o vento é predominante de Norte em todas as latitudes, mais intenso a Sul que a Norte, até ao dia 250 (7 de Setembro) que passa a ser predominante de Sul. A Norte de 40° N os filamentos são escassos devido às imagens nem sempre permitirem a detecção da sua extensão completa uma vez que são filamentos de elevada extensão. Os filamentos observados a Sul estão permanentemente localizados ao largo dos principais cabos nomeadamente Cabo de São Vicente (37° N), Cabo de Sines (38° N), Cabo da Roca (38,8° N) e Cabo Carvoeiro (39,3° N). A partir de 7 de Setembro encontram-se poucas imagens sem cobertura de nuvens deixando de se registar a presença de filamentos (excepto no Cabo Finisterra).

Os filamentos observados nas imagens do modelo ROMS (figura 21b) têm padrões semelhantes aos filamentos das imagens de satélite encontrando-se de forma irregular a Norte de 40° N, enquanto a Sul se encontram junto aos principais cabos. A partir do dia 7 de Setembro deixa-se de encontrar filamentos excepto nos Cabos Carvoeiro (39,3° N) e Finisterra (42,9° N).

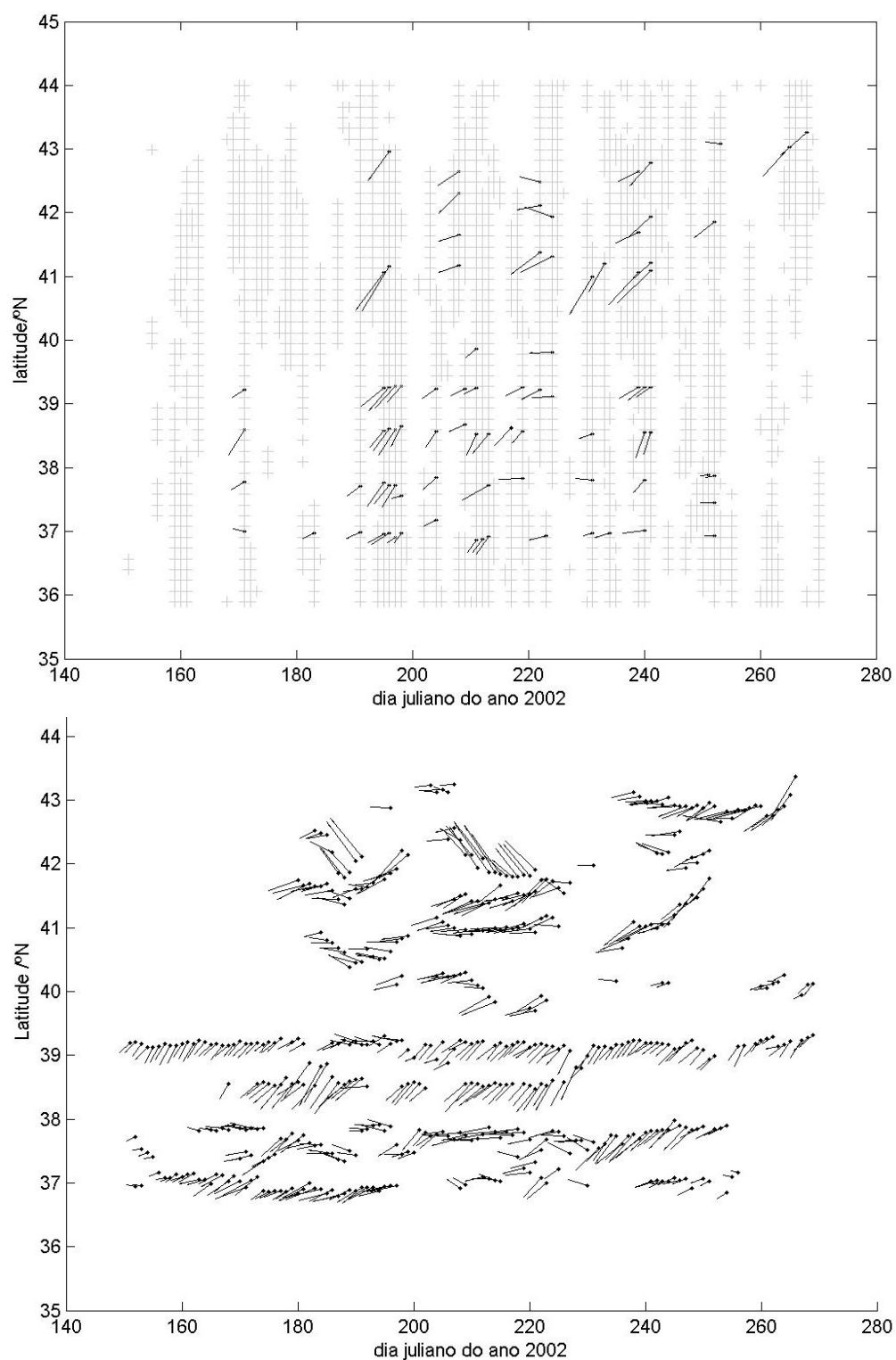


Figura 2. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.

Ano 2004: A figura 23 apresenta a distribuição anual e meridional dos filamentos registados ao longo do ano 2004, observados pelo (a) satélite e (b) modelo.

A Norte dos 39°N (CC) muitas imagens têm interferência de nuvens em Julho e Agosto não sendo até detectado nenhum filamento em Agosto. Em Julho há dois períodos (dias 190-197 e dias 204-212) com imagens sem nuvens e com filamentos em Aveiro, Porto e Finisterra. Na saída do modelo ROMS nos dias 225 a 240 (12 e 27 de Agosto) não são encontrados filamentos no Norte ajudando a comprovar que não é só por causa de falta de imagens que não se encontram filamentos. Este período de falta de filamentos coincide com um período em que a direcção do vento é de Sudoeste após o dia 220 (7 de Agosto) durando 12 dias, observado na figura A4. Apesar disso o vento médio em Agosto de 2004 tem grande amplitude principalmente nas latitudes a Sul sendo a média de 2004 a maior relativamente aos outros anos (figuras 4 e 5). Junho e Agosto são anormalmente quentes (anomalias da temperatura nas figuras 10 e 11). Por outro lado as anomalias da temperatura em Julho são negativas e dão lugar a filamentos.

Na zona a Sul o número de filamentos é mais constante tal como as latitudes das origens dos filamentos ao longo do período em estudo. Aparecem filamentos ao largo dos 39°N (CC), 38.8°N (CR) e 38°N (Si) e no final de Agosto aparecem durante os dias 236 (23 de Agosto) a 248 (4 de Setembro) apenas nos 37°N (SV). Em Junho e Julho aparece um filamento na costa alentejana tanto nas imagens do modelo ROMS como do satélite mas no modelo ROMS a sua origem encontra-se em São Vicente enquanto no Satélite em Sines

Depois do dia 260 (16 de Setembro) voltam-se a encontrar imagens sem nuvens em todas as latitudes e filamentos tanto a Sul como a Norte, sendo pontos principais Finisterra, Porto, Aveiro, Cabo Carvoeiro, Sines e S. Vicente.

Ano 2005: A figura 24 apresenta a distribuição anual e meridional dos filamentos registados ao longo do ano 2005, observados pelo (a) satélite e (b) modelo.

A Norte dos 42°N (Vi) os ventos predominam de nordeste sendo favoráveis ao afloramento na costa oeste (devido à componente Norte do vento, observa-se na figura 5 a tensão meridional do vento no ponto de Norte elevada em relação aos outros anos) e na costa Norte (devido à componente Este do vento) da Galiza, observados na figura 4 e A5. As anomalias da temperatura são negativas nessa região (figuras 10 e 11). Formam-se filamentos com direcção noroeste em Julho e Agosto com origem no cabo Finisterra tal como se observa também nos resultados do modelo ROMS (figura 23b).

No cabo Carvoeiro (39,3° N) e da Roca (38,8°N) quando há imagem, aparecem filamentos nas imagens de satélite com orientação para oeste, pouco extensos no Carvoeiro e mais na Roca. No modelo aparece apenas a origem de um filamento entre os dois cabos englobando os dois filamentos que aparecem no satélite pois as suas larguras são superiores no modelo devido à resolução dos ventos utilizados no modelo.

Não se observa filamento em Sines (38°N) ao longo do período em estudo, de notar que as anomalias da temperatura (figuras 10 e 11) a essa latitude são positivas maioritariamente nos meses de Julho e Agosto. Nas figuras 4 e 5 observa-se que os ventos de Norte são menos intensos nas latitudes a Sul do que noutros anos.

Em inícios de Julho (dia juliano 188) forma-se o filamento de São Vicente (37°N) na direcção Sul e ao longo do tempo inclina-se em cunha na direcção do mediterrâneo, que se deixa de observar na figura 24a pois já pertence à costa Sul Algarvia. A partir de Agosto (dia Juliano 220), no cabo de São Vicente, formam-se filamentos esporádicos sem serem extensos até que começando Setembro aparecem regularmente.

Entre os dias 160 e 220 é raro aparecerem imagens sem nuvens embora se encontrem filamentos quando as há nomeadamente ao largo do Porto, Cabo Finisterra e Cabo Carvoeiro. Nos resultados do modelo ROMS observam-se quatro filamentos predominantes neste período: S. Vicente, Carvoeiro, Porto e Finisterra. Os períodos com mais imagens de satélite são do dia 220 ao 240 e do 260 até ao fim de Setembro, em que no primeiro período nas imagens de satélite aparecem filamentos no Cabo São Vicente, Cabo da Roca, Cabo Carvoeiro, Porto e Cabo Finisterra, e no segundo aparecem filamentos no Cabo São Vicente, Cabo da Roca, Cabo Carvoeiro e Porto. Nas imagens do modelo ROMS aparecem os mesmos excepto o filamento do Cabo da Roca que se representa juntamente com o filamento do Cabo Carvoeiro.

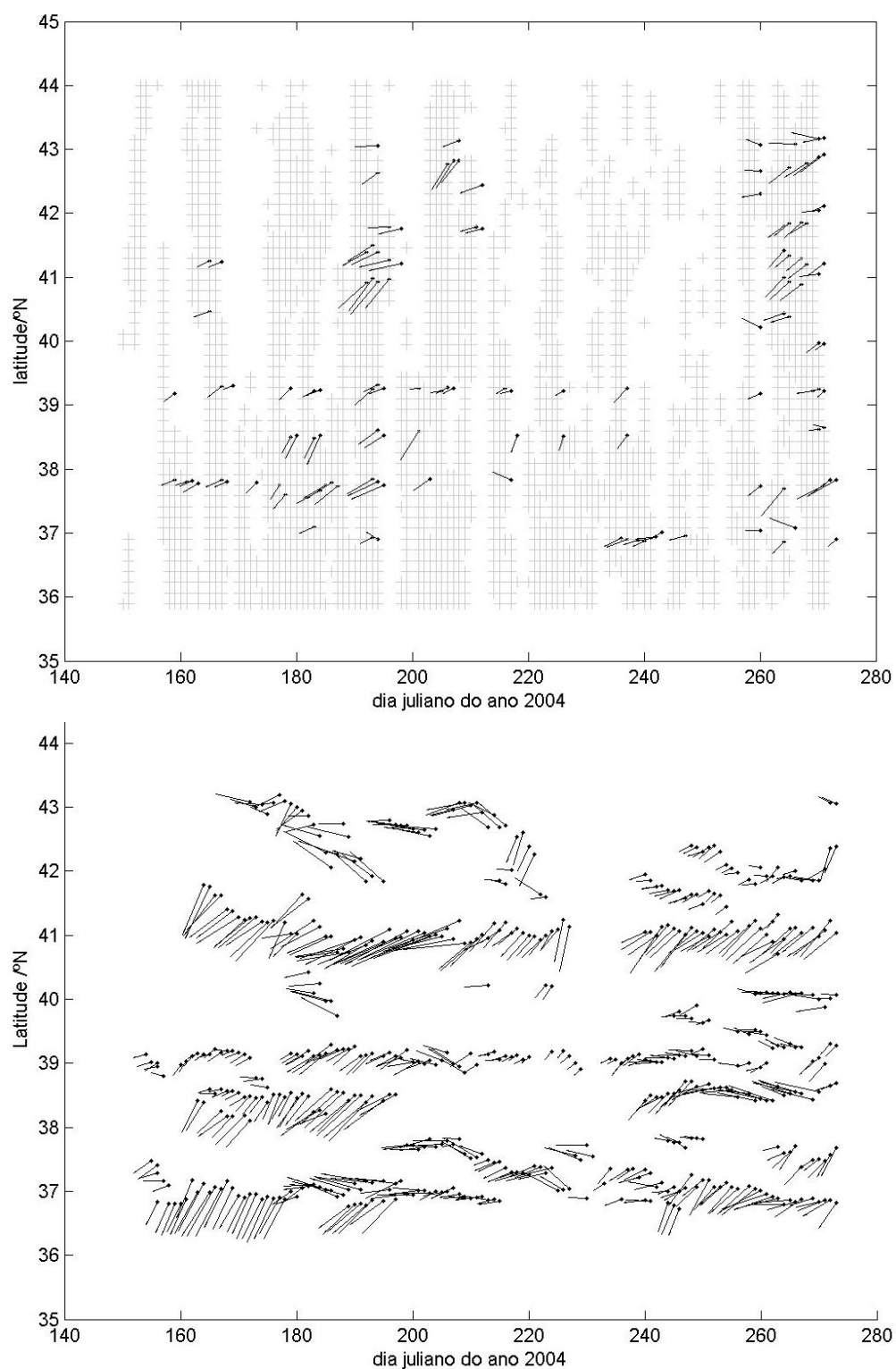


Figura 3. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.

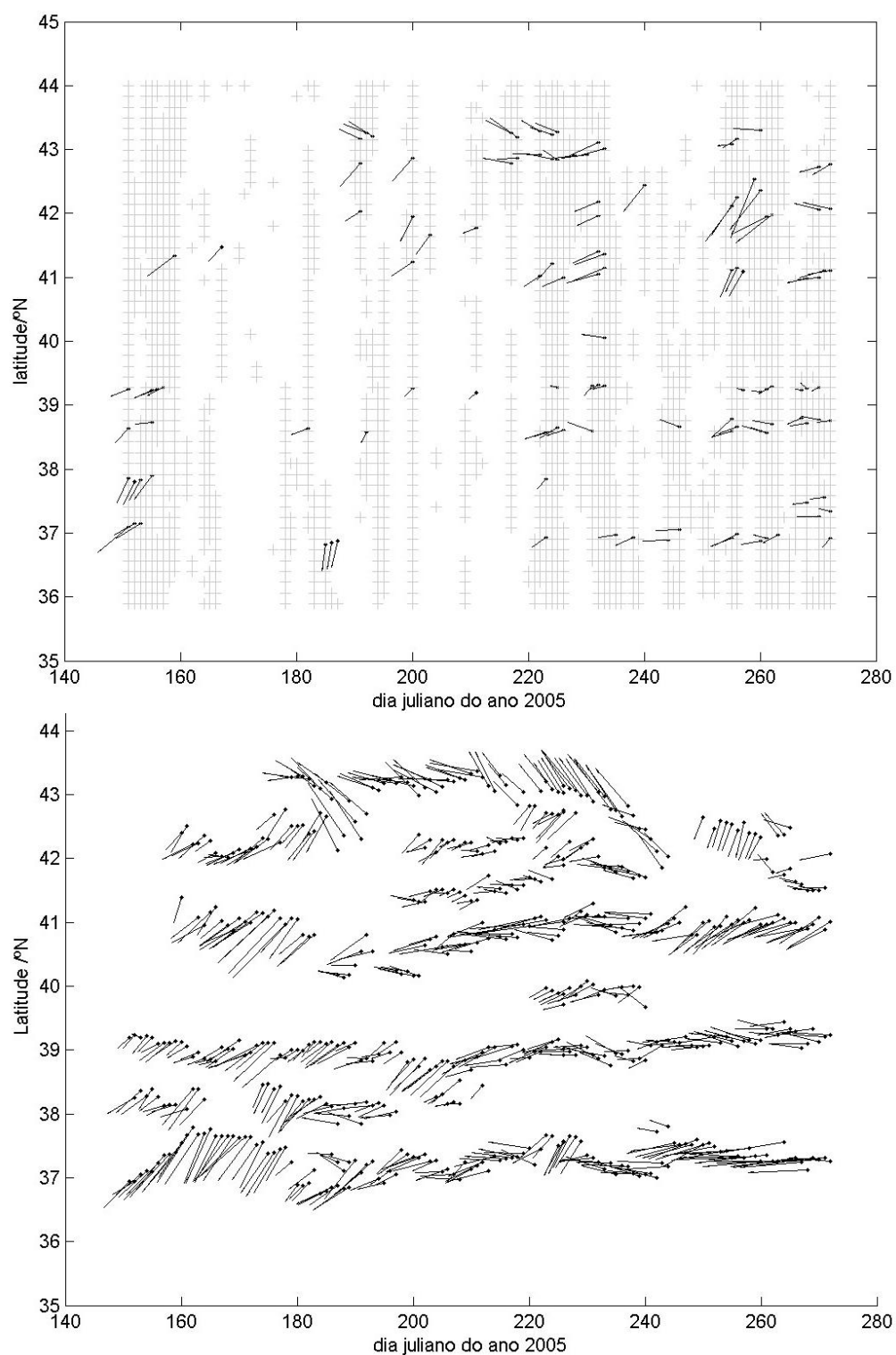


Figura 4. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.

Ano 2008: A figura 27 apresenta a distribuição anual e meridional dos filamentos registados ao longo do ano 2008, observados pelo (a) satélite e (b) modelo.

A Norte as imagens disponíveis são encontradas com regularidade em até finais de Julho (dia juliano 210) acompanhadas pelo regime de vento de Norte (figuras 4 e 5). Encontram-se apenas filamentos em volta de duas latitudes, o do Porto ($41,1^{\circ}$ N) que aparece em Junho e Julho, e o de Finisterra ($42,9^{\circ}$ N) que aparece só em Julho. Em Agosto há um défice de imagens sem nuvens implicando na diminuição de filamentos encontrados, a anomalia da temperatura para o mês de Agosto é positiva a Norte dos 40° N (figura 11) e o vento em Agosto é fraco (figura 5). No Modelo ROMS não aparecem filamentos entre os dias 220 (7 de Agosto) e 260 (16 de Setembro) nas latitudes a Norte de 41° N (Po) podendo-se inferir que não aparecem filamentos bloqueados pelas nuvens nas imagens de satélite. Em Setembro (por volta de dia 255) voltam a aparecer imagens e a direcção do vento (figura A8) é favorável à formação de filamentos, embora a anomalia da temperatura no mês de Setembro seja positiva devido aos primeiros dias, podendo assim se observar nas latitudes de Aveiro, Vigo e Finisterra alguns filamentos não muito extensos.

Com o Vento direccionado de Norte na região a Sul dos 40° N (FF) até início de Setembro observam-se frequentemente imagens sem nuvens (os 5 dias depois do 200, 18 de Julho, são a excepção). Os filamentos aparecem regularmente nos Cabos Carvoeiro ($39,3^{\circ}$ N), da Roca ($38,8^{\circ}$ N), São Vicente (37° N) e por vezes em Sines (38° N) durante todos os meses.

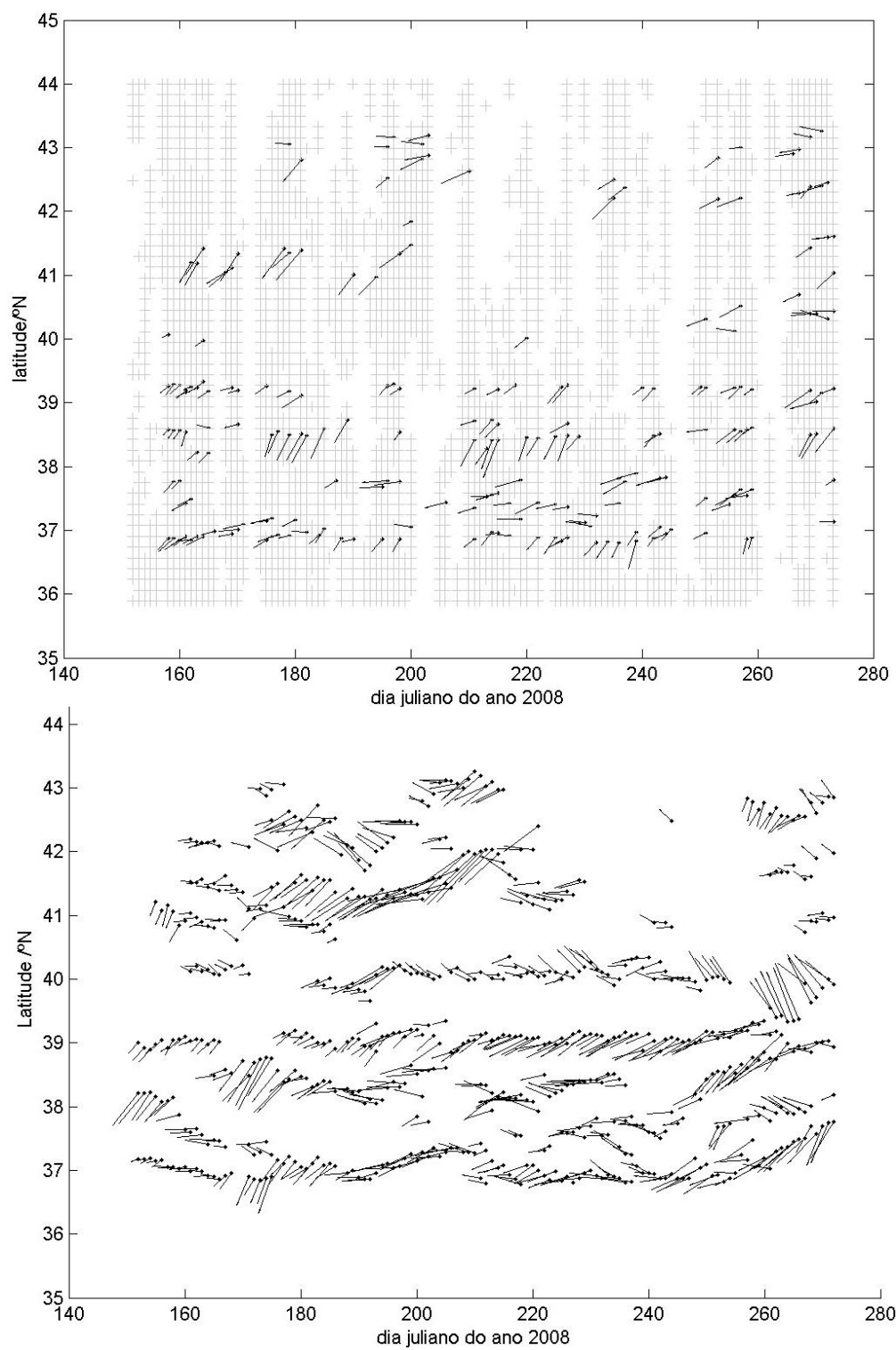


Figura 5. Séries temporais demonstrando a evolução dos filamentos na Costa Oeste da Península Ibérica. Pontos representam a origem e linhas representam a direcção e comprimento dos filamentos. (a) Satélite (b) Modelo. Uma unidade eixo y = 150km ; uma unidade eixo x = 25km.